

Modellbasierte Prognose der Straßenverkehrssicherheit

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

einer Doktor-Ingenieurin oder eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: René S. Hosse
aus (Geburtsort): Braunschweig

eingereicht am:	06. September 2018
mündliche Prüfung:	13. November 2018
Referentinnen oder Referenten:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder Prof. Dr.-Ing. Jürgen Leohold

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand auf Basis meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (iVA) der Technischen Universität Braunschweig in den Jahren 2011 bis 2017 und nebenberuflich während meiner Tätigkeit als Lead Assessor Automotive im Assessment Service Center der ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH.

Danken möchte ich dem ehemaligen Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder für die stetig durchgeführte fachübergreifende Betreuung und Unterstützung meiner Dissertation. Die mir zugetrauten Aufgaben und Verantwortlichkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Assistent der Institutsleitung haben es mir erlaubt mein Potential stetig auszubauen, an meinen Aufgaben zu wachsen und diese Dissertation zur Reife zu bringen.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Leohold, Leiter der AutoUni der Volkswagen Aktiengesellschaft Wolfsburg, für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ebenfalls danken möchte ich den Mitarbeitern des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, welche mit guten Ratschlägen und ausgiebigen Diskussionen an der Arbeit beteiligt gewesen sind. Insbesondere gilt mein Dank meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Felix Reinbold, Herrn Dr.-Ing. Tamás Kurczveil, Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jan Welte und Herrn Dr.-Ing. Dirk Spiegel. Weiterhin möchte ich dem Leiter des Assessment Service Centers Herrn Dr.-Ing. Lars Schnieder danken, der mir den benötigten zeitlichen Freiraum zum Abschluss meiner Dissertation eingeräumt hat.

Abschließend danke ich auf ganz besondere Weise meinen Eltern Gabriele und Uwe Hosse, welche es mir ermöglicht haben das Studium des Wirtschaftsingenieurwesens und damit anschließend die Promotion durchzuführen. Sie sind stets kritische Berater, die mir zur Seite stehen. Außerdem möchte ich meiner Frau Christina, meinem Sohn Noah Eliau und meiner Tochter Marla Elenor danken. Ohne Ihre kontinuierliche Unterstützung und das Verständnis für die geistige und physische Abwesenheit des Ehemanns und Vaters wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Widmung

Für Christina, Noah Elia und Marla Elenor

*„Ich habe nicht versagt.
Ich habe mit Erfolg zehntausend Wege gefunden
die zu keinem Ergebnis führen“*
(Thomas Alva Edison)

Kurzfassung

Die Sicherheit im deutschen Straßenverkehr hat dank zahlreich ergriffener Maßnahmen der Wissenschaft, der Politik, der Hersteller und der Gesellschaft mittlerweile ein hohes Niveau erreicht. Dennoch verlieren rund dreitausend Menschen jährlich ihr Leben durch ihre aktive Verkehrsteilnahme. Es bleibt das gemeinschaftliche Ziel aller am Verkehrssystem Beteiligten weiterhin das Sicherheitsniveau zu erhöhen und kontinuierlich die Zahl der Getöteten zu senken. Die Einführung der Promillegrenze im Jahr 1973 hatte einen sprunghaften Effekt der Reduzierung der Anzahl Getöteter hervorgerufen. Aktuell ergriffene Maßnahmen zeigen dagegen wenig bis gar keinen Effekt in den Verkehrsstatistiken. Welche der vorhandenen und geplanten Verkehrssicherheitsmaßnahmen eine höhere Wirkung erzielt und kurzfristig zu einer Verbesserung der Sicherheit führt, konnte bisher nicht geklärt werden.

Diese Dissertation befasst sich mit der modellbasierten Prognose der Verkehrssicherheit in Abhängigkeit von verkehrsmittel-, verkehrsobjekt-, verkehrsinfrastruktur- und verkehrsorganisationsseitigen Maßnahmen. Zentrale Zielsetzung ist hierbei die Definition und Qualifizierung eines Verfahrens zur fundierten Erstellung eines Prognosemodells, welches in der Lage ist den Sicherheitsnutzen ausgewählter Maßnahmen zu evaluieren und zu prognostizieren. Entscheidungsträgern der Verkehrssicherheit kann somit eine Methode zur strategischen Entscheidungsfindung bereitgestellt werden. Das im Rahmen dieser Dissertation definierte Verfahren prognostiziert die Entwicklung der Verkehrssicherheit mittels eines zweistufigen Verfahrens: Im ersten Schritt wird der Sicherheitsnutzen, bzw. das Sicherheitspotential, einer ausgewählten Maßnahme auf Basis des Wirkungsfelds, dem erwarteten Potential zur Unfallreduktion, hier dem Sicherheitsgewinn, und dem Grad der Systempenetration bestimmt. In einem zweiten Schritt wird mittels eines qualifizierten mathematischen Verfahrens die Prognose der Verkehrssicherheit unter Einbindung des zuvor bestimmten Sicherheitspotentials bestimmt. Hierbei wurde im Rahmen der Arbeit eine Reihe unterschiedlicher daten-, modellbasierter und hybrider Verfahren angewendet. Die finale Prognosemethode nutzt ein hybrides Modellkonzept, welches mittels Grautheorie (Grey System Theory) und künstlicher neuronaler Netze eine Verkehrssicherheitsprognose durchführt. Die exemplarische Anwendung des Verfahrens betrachtet ausgewählte Verkehrssicherheitsmaßnahmen und analysiert ihren Einfluss auf die Entwicklung der Verkehrssicherheit. Es wird eine Priorisierung hinsichtlich der prognostizierten Wirkung auf die Sicherheit vorgenommen. Die Arbeit liefert Implikationen für Entscheidungsträger, welche Maßnahmen zur kurzfristigen Verbesserung der Verkehrssicherheit gefördert werden sollten.

Schlagwörter: Verkehrssicherheit, Maßnahmen, Prognose, Zeitreihenanalyse, methodische Modellbildung, Grey Systems Theory, Künstliche Neuronale Netze

Abstract

Safety in German traffic has now reached a high level thanks to numerous measures taken by science, politics, manufacturers and society. Nevertheless, around three thousand people lose their lives every year through their active participation in the transport system. It remains the joint objective of all participants in the transport system to continue to increase the level of safety and to continuously reduce the number of fatalities. Where, in contrast to the introduction of the alcohol limit in 1973, a precipitous effect in terms of improving the number of people killed has been shown, the measures currently taken have little or no effect on transport statistics. Which of the existing and planned traffic safety measures has a higher impact and leads to an improvement in safety in the short term has not yet been clarified.

This dissertation deals with the model-based prognosis of traffic safety as a function of means of transport, traffic, traffic infrastructure and traffic organization. The central objective here is the definition and qualification of a method for the well-founded preparation of a prognosis model, which is able to evaluate and predict the safety benefits of selected measures. Road safety decision-makers will thus be provided with a method of strategic decision-making. The method defined in this dissertation predicts the development of traffic safety by means of a two-stage procedure: In the first step, the safety benefit or safety potential of a selected measure based on the effective field, the expected potential for accident reduction and the degree of accident reduction System penetration determined. In a second step, the prediction of traffic safety is determined by incorporating the previously determined safety potential by means of a mathematical method to be qualified. In the course of the work, a number of different data, model-based and hybrid methods were applied and qualified. The final qualified forecasting method uses a hybrid model concept, which uses gray system theory and artificial neural networks to carry out a traffic safety prognosis. The exemplary application of the method looks at selected traffic safety measures and analyzes their influence on the development of traffic safety. Prioritization is made on the predicted safety impact and implications for policy makers on what measures should be taken to improve road safety in the short term.

Keywords: traffic safety, safety measures, prediction, time series analysis, methodical modeling, Grey Systems Theory, Artificial Neural Networks

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Entwicklung der Verkehrssicherheit	2
1.2	Entscheidungsfindung in der Verkehrssicherheit	6
1.2.1	Entscheidungsträger Politik	7
1.2.2	Entscheidungsträger Fahrzeughersteller	8
1.3	Problemstellung der Arbeit	9
1.4	Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit.....	10
1.5	Konzept der Wirkfeld-Prognosen.....	12
1.6	Struktur der Arbeit.....	14
1.7	Vorarbeiten am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik.....	15
2	Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit.....	19
2.1	Technische Ressourcen als Gefährdungsquellen.....	20
2.1.1	Verkehrsmittelseitige Einflussfaktoren	20
2.1.2	Verkehrsinfrastrukturseitige Einflussfaktoren	23
2.2	Menschliche Ressourcen als Gefährdungsquellen	24
2.2.1	Individuell-menschliche Einflussfaktoren.....	24
2.2.2	Kollektive Einflussfaktoren	27
2.3	Institutionelle Ressourcen als Gefährdungsquelle	29
2.3.1	Einflussfaktor Policy	30
2.3.2	Einflussfaktor Polity.....	30
2.4	Marktwirtschaftliche Ressourcen als Gefährdungsquelle.....	30
2.4.1	Herstellerseitige Einflussfaktoren	31
2.4.2	Versicherungswirtschaftliche Einflussfaktoren	32
2.5	Schlussfolgerungen.....	33
3	Methodischer Ansatz.....	35
4	Prognoseverfahren zur Verkehrssicherheit	39
4.1	Grundlegende Fragestellung von Prognosen.....	39
4.1.1	Prognosen im engeren Sinne	40
4.1.2	Prognosen im weiteren Sinne.....	40
4.1.3	Prognoseproblematik	40
4.2	Prognosemodelle	41
4.3	Datenbasierte Prognoseverfahren.....	42
4.3.1	Zeitreihenanalysen	43
4.3.2	Parameterschätzverfahren	45
4.3.3	Künstliche Neuronale Netze	48
4.3.4	Stochastische Prognoseverfahren	51
4.4	Modellbasierte Prognoseverfahren	55
4.4.1	Systemtheoretische Verfahren	55
4.4.2	Hybride Verfahren	56
4.5	Wirkungsanalysen	57
4.5.1	Retrospektive Wirkungsanalysen	58
4.5.2	Prospektive Wirkungsanalysen.....	59
4.6	Schlussfolgerungen.....	60
5	Modellkonzepte zur Verkehrssicherheitsprognose	65

5.1	Systemtheoretische Modellkonzepte	65
5.1.1	Biologische Systemtheorie	66
5.1.2	Soziologische Systemtheorie.....	67
5.1.3	Psychologische Systemtheorie	67
5.1.4	Ingenieurs - und wirtschaftswissenschaftliche Systemtheorie.....	68
5.2	Sicherheitsmodellkonzepte	69
5.2.1	DominoModellkonzept	70
5.2.2	Swiss-Cheese-Modellkonzept	70
5.2.3	STAMP - Modellkonzept	71
5.2.4	Modellkonzept der Unfallforschung	72
5.3	Regelungstechnische und systemdynamische Modellkonzepte	74
5.3.1	Mikro - bis mesoskopische Modellkonzepte	74
5.3.2	Makroskopische Modellkonzepte.....	75
5.3.3	Aggregierte stochastische Modellkonzepte	77
5.3.4	Aggregierte regelungstechnische Modellkonzepte	78
5.3.5	Kybernetische Modellkonzepte	79
5.4	Schlussfolgerungen.....	82
6	Konzeption und Entwicklung des Prognoseverfahrens	85
6.1	Anforderungen an das modellbasierte Prognoseverfahren	85
6.1.1	Modellvereinfachung und - diskretisierung.....	86
6.1.2	Modellkonzept und Parametrierung.....	87
6.1.3	Physikalischer Geltungsbereich.....	88
6.1.4	Modellgrenzen	88
6.1.5	Zulässige Grenzwerte und Abweichungen	89
6.2	Qualifizierung der verfügbaren Prognoseverfahren	90
6.2.1	Anwendung datenbasierter Prognoseverfahren	91
6.2.1.1	$GM(1,n)$	91
6.2.1.2	$GM(2,n)$	94
6.2.1.3	$MGM(1,n)$	96
6.2.1.4	Neuronale Netzwerke (NN).....	98
6.2.2	Anwendung modellbasierter Prognoseverfahren	99
6.2.2.1	System Dynamics (SD).....	99
6.2.2.2	NN-GA.....	102
6.2.2.3	SD-GST.....	105
6.2.3	Auswahl des Prognoseverfahrens.....	106
6.3	Sicherheitspotential.....	109
6.3.1	Formale Definition des Sicherheitsgewinns S	111
6.3.2	Formale Definition der Systempenetration $M(t)$	111
6.3.3	Formale Definition des Wirkfelds A	112
6.3.4	Formale Definition des Sicherheitspotentials $R(t)$	113
6.4	Prognosemodell	114
6.4.1	Multilayer Perceptron Netz	115
6.4.2	Modelloptimierung	117
6.4.3	Modell-Inputs.....	119
6.4.3.1	Zielvariable Y_m	119
6.4.3.2	Sicherheitspotentialzeitreihen R_n	119
6.4.3.3	Kausalzeitreihen X_o	120

6.4.4	Toolgestützte Durchführung der Wirkungsprognose	121
7	Exemplarische Anwendung	125
7.1	Maßnahmenkatalog	125
7.1.1	Verkehrsmittelseitige Maßnahmen.....	127
7.1.2	Verkehrsobjektseitige Maßnahmen	127
7.1.3	Verkehrsinfrastrukturseitige Maßnahmen.....	128
7.1.4	Verkehrsorganisationsseitige Maßnahmen	128
7.1.5	Eingrenzung der betrachteten Maßnahmen	128
7.2	Unfalldatenbank	130
7.3	Bestimmung der Modell-Inputs	130
7.3.1	Zielvariablen Y_m	130
7.3.2	Sicherheitspotentiale R_n	132
7.3.3	Kausalzeitreihen X_o	133
7.4	Darstellung der Prognoseergebnisse.....	135
7.4.1	Infrastrukturspezifisches Unfallaufkommen.....	135
7.4.1.1	<i>Getötete außerhalb von Ortschaften</i>	<i>135</i>
7.4.1.2	<i>Getötete innerhalb von Ortschaften.....</i>	<i>136</i>
7.4.1.3	<i>Getötete auf Autobahnen</i>	<i>138</i>
7.4.1.4	<i>Getötete im Baustellenbereich</i>	<i>139</i>
7.4.1.5	<i>Getötete auf Bundesstraßen.....</i>	<i>140</i>
7.4.1.6	<i>Getötete auf Kreisstraßen</i>	<i>141</i>
7.4.2	Unfallaufkommen an Verkehrsmodenübergängen	143
7.4.2.1	<i>Getötete an Fußgängerüberwegen.....</i>	<i>143</i>
7.4.2.2	<i>Getötete an Bahnübergängen</i>	<i>144</i>
7.4.3	Witterungsverhältnisspezifisches Unfallaufkommen	145
7.4.3.1	<i>Getötete bei Tageslicht.....</i>	<i>145</i>
7.4.3.2	<i>Getötete bei Dämmerung</i>	<i>146</i>
7.4.3.3	<i>Getötete bei Dunkelheit.....</i>	<i>148</i>
7.4.3.4	<i>Getötete bei Nebel.....</i>	<i>149</i>
7.4.4	Ursachenspezifisches Unfallaufkommen	150
7.4.4.1	<i>Getötete durch Übermüdung.....</i>	<i>150</i>
7.4.4.2	<i>Getötete durch Alkoholeinfluss</i>	<i>151</i>
7.4.4.3	<i>Getötete durch Baum-Aufprall.....</i>	<i>153</i>
7.4.4.4	<i>Getötete durch Wildunfälle</i>	<i>154</i>
7.5	Implikationen für Entscheidungsträger	155
7.5.1	Empfehlungen für infrastrukturspezifische Wirkfelder	155
7.5.2	Empfehlungen für Transportmodenübergänge	156
7.5.3	Empfehlungen für witterungsspezifische Wirkfelder	156
7.5.4	Empfehlungen für ursachenspezifische Wirkfelder.....	157
7.6	Ausblick hochautomatisiertes Fahren	158
8	Kritische Würdigung und weiterer Forschungsbedarf	161
8.1	Prüfung der Anforderungen an das Prognoseverfahren und kritische Würdigung	161
8.2	Weiterer Forschungsbedarf.....	163
9	Zusammenfassung.....	167
	Literaturverzeichnis.....	171
	Abbildungsverzeichnis	193
	Tabellenverzeichnis.....	197

Anhang A: Anwendung GM(1,3)	200
Anhang B: Anwendung GM(2,3).....	201
Anhang C: Anwendung unterschiedlicher Trainingsalgorithmen	202
Anhang D: System Dynamics Modell	204
Anhang E: Prüfung der Anforderungen der qualifizierten Methoden.....	206
Anhang F: Maßnahmen im Katalog	210
Anhang G: Potentielle Kausalzeitreihen	213
Anhang H: Korrelationswerte und Signifikanzniveaus der Kausalzeitreihen.....	214
Anhang I: Kausalzeitreihen	215

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Automatic Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AIS	Abbreviated Injury Scale
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CAST	Causal Accident Analysis based on STAMP
ECE	Economic Commission for Europe
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
FAS	Fahrerassistenzsystem
FGSV	Forschungsgesellschaft für Verkehr
FWI	Fatality Weighted Injuries
GA	Genetischer Algorithmus
GABP	Genetic Algorithm Backpropagation
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherer
GIDAS	German in depth Accident Study
GM	Grey Model
GST	Grey Systems Theory
HAF	Hochautomatisiertes Fahren
KNN	Künstliche Neuronale Netze
LG	Latente Gefährdungssituationen
MGM	Modified Grey Model
MSP	Multiple Streams Perspective

NARX	Non-linear auto regressive
NBA	Notbremsassistent
NN	Neuronale Netze
OTA	over the air
PAYD	pay as you drive
PDC	Park Distance Control
RNN	Rekurrente Neuronale Netze
SAE	Society of Automotive Engineers
SD	System Dynamics
SMS	Sicherheitsmanagementsystem
SOTIF	Safety of the intended functionality
STAMP	Systems-Theoretic Accident Model and Processes
STECA	STAMP based Early Concept Analysis
STPA	Systems-Theoretic Process Analysis
TDNN	Time Delay Neural Networks
UDV	Unfallforschung der Versicherer
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VS	Verkehrssicherheit

Symbolverzeichnis

A	Wirkfeld
G	Prognosehorizont
M	Systempenetration
m	Markt-/Systempotential
N	kumulierte Anzahl der Maßnahmen
P	Innovationskoeffizient
q	Imitationskoeffizient
R	Sicherheitspotential
S	Sicherheitsgewinn
t	Zeit
T	Aktueller Zeitpunkt
U	Anzahl der Unfälle
X	Kausale Prädiktorvariable
Y	Zielvariable

1 Einleitung

*"Wenige Menschen denken,
und doch wollen alle entscheiden."*

(Friedrich II der Große)

Sichere Mobilität stellt eine fundamentale Voraussetzung für die Erfüllung individueller, gesellschaftlicher, politischer, wie auch volks- und betriebswirtschaftlicher Bedürfnisse dar, wie vom wissenschaftlichen Beirat des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und in der Berliner Erklärung der VDI (Verein Deutscher Ingenieure) Gesellschaft formuliert ist. Die Straßenverkehrssicherheit ist somit als eine Notwendigkeit für eine nachhaltige Mobilität anzusehen. Allerdings erweist sich der öffentlich zugängliche Straßenverkehr mit seinem divergenten Verkehrsteilnehmer als hochgradig unfallträchtig. Zudem muss der Straßenverkehr neben der Sicherheit weiteren Anforderungen gerecht werden. Dazu zählen

- die Erhaltung der *Leistungsfähigkeit*, hinsichtlich stetig steigender Verkehrsnachfrage
- die *wirtschaftliche Bedeutung*, hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs und der Ressourcenbindung, ebenso seiner wachstumsfördernden Wirkungen
- die *ökologische Verträglichkeit*, hinsichtlich Lärm und Luftschadstoffemissionen sowie der Einfluss auf den Klimawandel
- die *Sozialverträglichkeit*, hinsichtlich der gesellschaftlichen Kosten-Nutzen-Verteilung
- die *Innovationsfähigkeit* des Straßenverkehrs durch Teilnahme am technologischen Fortschritt und daraus resultierender Effizienzsteigerungen.

Die Erhaltung der Verkehrssicherheit und die Erfüllung der vorangegangenen Anforderungen an den Straßenverkehr sind deswegen eine der dringlichsten Aufgaben der Verkehrspolitik und der am Verkehr beteiligten Akteure [Assing et.al. 2010] [Schnieder u. Schnieder 2013] [VDI 2016]. Die Zielsetzung dieser Dissertation ist die Erarbeitung einer modellbasierten Prognose der Straßenverkehrssicherheit und Berücksichtigung des Einflusses dedizierter Verkehrssicherheitsmaßnahmen. Um diese Zielsetzung zu motivieren, wird im folgenden Abschnitt 1.1 die Entwicklung der Verkehrssicherheit dargelegt. Im Anschluss daran wird erörtert, wie der Entscheidungsprozess von den am Verkehr beteiligten Akteuren abläuft, welche Entscheidungsträger einen direkten Einfluss auf die Verkehrssicherheit ausüben und worin die Entscheidungsfindung begründet wird (vgl. Abschnitt 1.2). Im Anschluss wird die zugrundeliegende Problemstellung der Arbeit (vgl. Abschnitt 1.3) beschrieben, die sich daraus ergebende Zielsetzung und vorgenommene Abgrenzung der Arbeit (vgl. Abschnitt 1.4) und die Struktur der Arbeit (vgl. Abschnitt 1.6). Im Abschnitt 1.5 wird das grundlegende Konzept der sog. Wirkfeld-Prognosen dargelegt, diese Art der Prognose stellt den methodischen Kern der Arbeit dar. Die Einleitung schließt mit einer kurzen Darstellung der relevanten Vorarbeiten am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (vgl. Abschnitt 1.6).

1.1 Entwicklung der Verkehrssicherheit

In den Jahren 2014 und 2015 zeigt sich ein erstmaliger Anstieg der Getöteten im Straßenverkehr seit dem Jahr 1991. Die Zahl der Verkehrstoten wird als primäres risikometrisches Maß zur Bemessung der Verkehrssicherheit verwendet. Wenn auch im Jahr 2016 der niedrigste Stand an Verkehrstoten mit 3214 verzeichnet werden konnte, sehen im Allgemeinen die Prognosen der BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) eher pessimistisch aus, so dass anzunehmen ist, dass die Unfallzahlen wieder steigen werden [Lerner et.al. 2014]. Das deutsche Statistische Bundesamt stellt daher die Frage: „Sind [...] neue Maßnahmen notwendig, um die Verkehrssicherheit nachhaltig zu verbessern, damit die auf nationaler und internationaler Ebene gesetzten Ziele erreicht werden können?“ [destatis 2018] Eine ähnliche Bewusstmachung der Verkehrssicherheit ergab sich bereits 1971. Nach dem höchsten Aufkommen an Verkehrstoten mit 19.193 im Jahr 1970 schrieb Der Spiegel in dem Beitrag „Sicherheitsautos – Für Tage ohne Tote“, dass die Automobilindustrie vor einem radikalen Wandel hinsichtlich der Verwendung neuer Sicherheitstechnologien steht und ohne eine disruptive Veränderung das Automobil gesellschaftlich als nicht mehr tragfähig angesehen werden wird [Der Spiegel 1971]. Ein ähnlicher Wandel steht dem Straßenverkehr erneut bevor: Die zunehmende Automatisierung des Verkehrsprozesses und das automatisierte Fahren selbst wird das Automobil zu einem neuen Produkt- und Dienstleistungsbündel transformieren und zu einem ebenfalls disruptiven technologischen und organisationalen Wandel der Mobilität führen [Leohold 2011] [Proff 2014]. Der Straßenverkehr steht folglich vor einem grundlegenden Wandel, der einer Intensivierung der Verkehrssicherheitsarbeit bedarf [Maurer et.al. 2015] [Die Zeit 2018].

Zur Realisierung und Erhaltung der Verkehrssicherheit folgen die Ingenieurwissenschaften hierbei dem Grundsatz einer sicherheitsorientierten Entwicklung, indem Verkehrssysteme unter Verwendung ausgewählter Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge weiterentwickelt und optimiert werden [Schnieder u. Schnieder 2013]. Dabei ist eine ganzheitliche und soziotechnische Betrachtungsweise des Straßenverkehrs unter Beachtung aller relevanten Konstituenten notwendig, um Ansätze zur Gewährleistung sicherer Mobilität zu entwickeln, zu evaluieren und zu präzisieren [Drewes 2009]. Dabei werden die Verkehrskonstituenten ihrerseits in vier Ressourcen unterteilt:

- *Verkehrsmittel* (auch: Transportmittel) sind die Gesamtheit stationärer, bzw. mobiler sowie materieller und/oder immaterieller verkehrswirtschaftlicher Produktionsfaktoren, welche die Verkehrsdienstleistung von Personen, Gütern oder Nachrichten erlauben [Schnieder 2007]. Konkret werden als Verkehrsmittel gezählt Straßen- oder Schienenfahrzeuge (auch Luft- oder Wasserfahrzeuge), einschließlich ihrer zugehörigen Verkehrsobjekte [Ammoser u. Hoppe 2006]. Für den Straßenverkehr wird als Verkehrsmittel die Menge aller Fortbewegungsmöglichkeiten, einschließlich Fußgängern, motorisiertem und nicht-motorisiertem Verkehr, bezeichnet [Schubert et.al. 2000].
- *Verkehrsobjekte* werden die Arbeitsgegenstände im Verkehrsprozess genannt. Diese beinhalten bewegliche Sachen, wie Personen (Reisender), Transportgüter (einschließlich Energie) und Informationen (Nachrichten und Daten) [Ammoser u. Hoppe 2006].
- *Verkehrsinfrastruktur* (auch: Verkehrsanlagen) definiert sich durch die Summe aller Einrichtungen personeller, materieller, institutioneller, informationeller und kommunikativer Art, welche den Transport von Verkehrsmitteln und Verkehrsobjekten auf Verkehrswegen ermöglichen [Ammoser u. Hoppe 2006]. Dahingehend ist eine Präzisierung der Begrifflichkeit der Verkehrsinfrastruktur hinsichtlich der Verkehrsweginfrastruktur sowie

der Verkehrsinformationsinfrastruktur und Verkehrskommunikationsinfrastruktur möglich [Schnieder u. Schnieder 2013]. Die informationelle und kommunikative Differenzierung ist von besonderer Bedeutung bei Steuerungs- und Regelungsaufgaben des Straßenverkehrs [Schnieder 2015].

- *Verkehrsorganisation* ist die Gesamtheit aller regelgeleiteten Prozesse, Funktionen, Handlungen und Strukturen zur Realisierung des Verkehrsablaufs. Ausgeführt wird die Verkehrsorganisation mittels menschlicher Verkehrsmittelführer und durch Weisungspersonal (z. B. Polizei) oder von technischen Einrichtungen, wie bspw. Fahrerassistenzsystemen oder Lichtsignalanlagen. Die Implementierung der Verkehrsorganisation, zu verstehen als Prozess, kann innerhalb der drei Ressourcen Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsmittel oder Verkehrsobjekt durchgeführt werden. Organisationseinheiten, wie Behörden oder Überwachungsvereine stellen ebenfalls Ressourcen der Verkehrsorganisation dar [Schnieder 1999].

Die verkehrspolitische Zielsetzung sieht eine stetige Verbesserung der Verkehrssicherheit vor. In der Berliner Erklärung zur Verkehrssicherheit werden fünf zentrale Handlungsfelder definiert:

- Nachhaltige Fahrzeugkonzepte auf höchstem Niveau,
- Schutz schwacher und ungeschützter Verkehrsteilnehmer,
- Entwicklung kooperativer Sicherheitstechnik,
- Erforschung von Unfallentstehung und Unfallfolgen verstärken und harmonisieren,
- Schaffung verlässlicher Rahmenbedingungen, vgl. [Schindler 2011].

Die Handlungsfelder resultieren in der Ergreifung gezielter Maßnahmen im Straßenverkehr. Allerdings lässt sich heute kein direkter Zusammenhang mehr zwischen der Einführung einer bestimmten Maßnahme und einem sichtbaren Effekt in den Verkehrsstatistiken erkennen. Für gesetzgeberische Maßnahmen lässt sich oftmals eine Kausalität zwischen der Maßnahmeneinführung und eingetretenen Verbesserungen im Verkehrsgeschehen identifizieren. Als Beispiele können die Einführung der Höchstgeschwindigkeit auf Landstraßen oder die Promilleobergrenze genannt werden. Hier bedingten die Maßnahmen einen sichtbaren Sprung im Verkehrssystem und resultierten in deutlich geringeren Unfallaufkommen mit tödlichen Folgen [destatis 2017]. Kausale Zusammenhänge hinsichtlich der Einführung neuer technischer Sicherheitsmaßnahmen sind deutlich schlechter nachweisbar. Aus verkehrsstatistischer Sicht sind zwar langfristige Trends erkennbar, aber ob die Einführung einer technischen Maßnahme einen unmittelbaren positiven Sicherheitseffekt erzielt, kann nicht plausibel ermittelt werden [GIZ 2015] [Stolte et.al. 2015]. Dies wird in Abbildung 1-1 verdeutlicht. Es wird die Entwicklung der Zahl Verunglückter im Straßenverkehr (im Jahresgang) im Kontrast zu den Verkehrstoten (im Monatsgang) und zusätzlich die Einführungszeitpunkte ausgewählter Maßnahmen für die vier Verkehrskonstituenten dargestellt. Die Zahl der Getöteten im Straßenverkehr zeigt dabei ein zyklisch wiederkehrendes Einschwingverhalten: Die Wintermonate weisen ein geringeres Aufkommen von Unfällen mit Todesfolge im Verhältnis zu den Sommermonaten auf [destatis 2017]. Die Darstellung der Verkehrstoten im Jahres- oder Monatsgang liefert zwar eine Aussage über die Trendentwicklung der Verkehrssicherheit für ein Verkehrssystem als Ganzes, allerdings ist die Verwendung als Entscheidungswerkzeug zur Identifikation der primären Handlungsfelder für Maßnahmen weniger geeignet. Daher eröffnet sich die Fragestellung, wo einerseits eine Verkehrsunsicherheit auftritt (ortsbezogen) und andererseits, welche Ursachen vorherrschen (kausalbezogen).

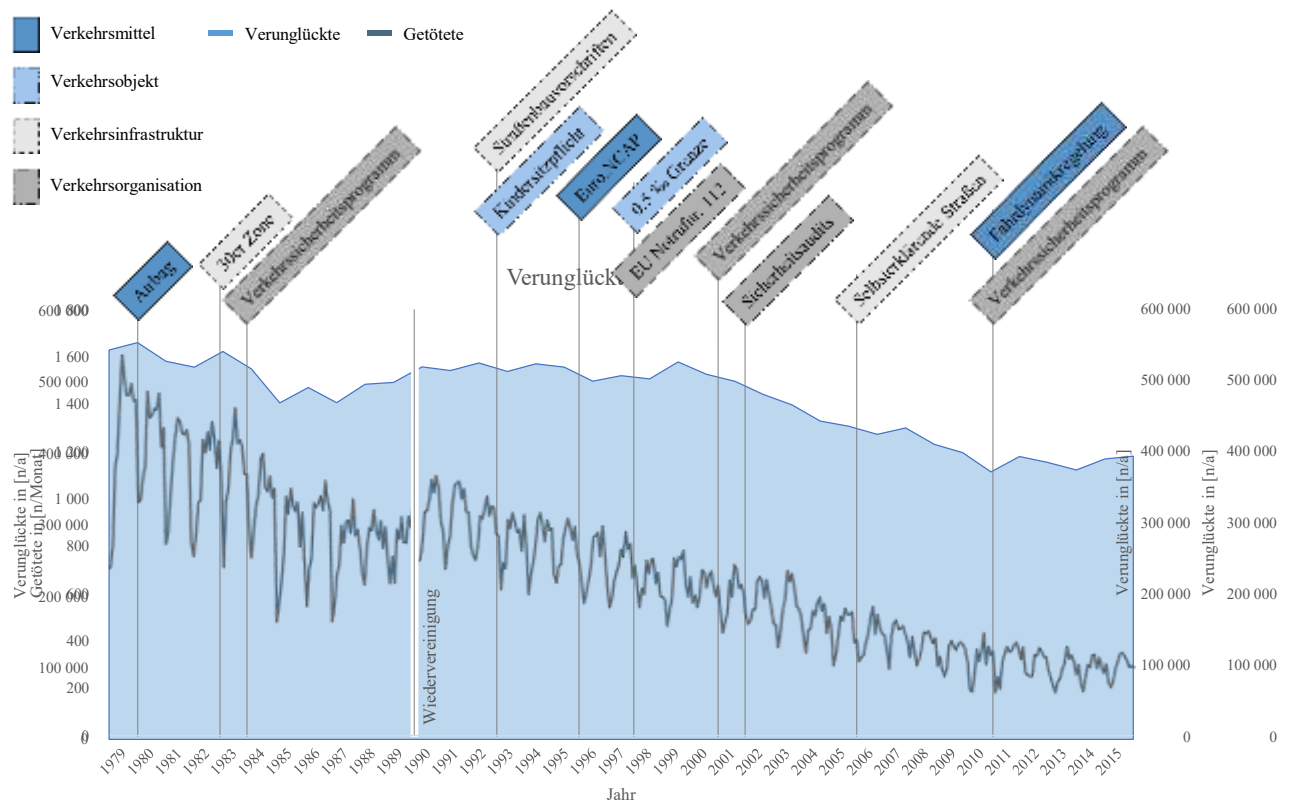


Abbildung 1-1: Vergleich Verunglückter, Getöteter und ausgewählter Maßnahmen, in Anlehnung an [GIZ 2015] [destatis 2017]

In der Tabelle 1-1 sind die tödlichen Unfälle nach Straßentyp (Autobahn, innerörtliche und außerörtliche Straßen) und Verkehrsmittel (Pkw, motorisierte Zweiräder, Fahrräder und Fußgänger) zugeordnet. Betrachtet man zuerst die Ortslage, so finden 58,9% der tödlichen Verkehrsunfälle außerorts statt. Tödliche Unfälle auf Autobahnen liegen bei 10,4% und bilden die kleinste Gruppe. Gut die Hälfte der Verkehrstoten sind Pkw-Fahrer, gefolgt von Fahrern motorisierter Zweiräder und Fußgänger. Die kleinste Gruppe der Getöteten wird durch Fahrradfahrer repräsentiert [destatis 2017].

Tabelle 1-1: Tödliches Unfallaufkommen nach Verkehrslage und Beteiligungsart 2016, nach [destatis 2017]

	Pkw		Motorisierte Zweiräder		Fahrräder		Fußgänger		Gesamt	
Autobahn	243	8,1%	40	1,3%	0	0,0%	30	1,0%	313	10,4%
Außer- orts	1106	36,6%	425	14,1%	142	4,7%	104	3,4%	1777	58,9%
Innerorts	182	6,0%	139	4,6%	251	8,3%	356	11,8%	928	30,7%
Gesamt	1531	50,7%	604	20,0%	393	13,0%	490	16,2%	3018	

Allgemein wird der Mensch als entscheidender Faktor, bzw. Ursache, von Verkehrsunfällen angesehen [Gründl 2005] [Gründl 2006]. So hat eine Studie nach [Bartl u. Hager 2006] herausgefunden, dass 42% aller Unfälle primär durch psychische Zustände, wie Stress, Sorgen, Traurigkeit

und Ärger, verursacht werden. Weiterhin werden 36% aller Unfälle durch eine Unaufmerksamkeit des Fahrers verursacht [Bartl u. Hager 2006]. Da der Fahrer primär an den Unfallursachen beteiligt ist, ergibt sich die Schlussfolgerung den operativen Fahrprozess zunehmend zu automatisieren. Als dringliche Wirkfelder für die Fahrprozessautomatisierung sieht der Gesamtverband der Deutschen Versicherer (GDV) hierbei

- die gerade Fahrt mit nicht angepasster Geschwindigkeit,
- Kurvenfahrten mit ebenfalls nicht angepasster Geschwindigkeit,
- Aufmerksamkeitsdefizite der Fahrer und die Fahrerevaluierung hinsichtlich alkoholisierter Fahrten [GDV 2011].

Hingegen liegt laut einer aktuellen Umfrage der Europäischen Union unter Straßenverkehrsteilnehmern der primäre Handlungsbedarf der Verkehrssicherheitsarbeit bei der Verbesserung der Straßeninfrastruktur (27,7%), gefolgt von der Durchsetzung und Verbesserung von Verkehrsgesetzen (25,2%). Das regelmäßige Auffrischen von Führerscheinkenntnissen (15,8%) und eine verstärkte Durchführung und Sichtbarkeit von Verkehrssicherheitskampagnen (9,9%) werden ebenfalls als relevante Handlungsoptionen bewertet [EU 2016].

Das Straßenverkehrssystem hat einen jahrzehntelangen Alterungsprozess durchlebt und dabei annähernd jährlich eine Verbesserung der Sicherheit erzielt. Dies wurde mittels stetiger Weiterentwicklung involvierter Verkehrsmittel, verbesserter Schulungs- und Erziehungsmaßnahmen von Verkehrsteilnehmern, einem sicherheitsgerichteten Ausbau der Verkehrsinfrastruktur und der Optimierung der Verkehrsorganisation erreicht [Amalberti 2001] [Schnieder u. Schnieder 2013]. Dennoch lassen aktuelle Tendenzen vermuten, dass die positiven Trends nicht gehalten werden können. Die sich ergebende Fragestellung aus der vorhergehenden Darstellung ist nun, welche Verkehrssicherheitsmaßnahmen eingeführt werden sollten und ob jede dieser Maßnahmen den intendierten Effekt erzielt. Gründl stellt bereits im Rahmen seiner Dissertation fest:

„Das Resultat dieses völlig einseitigen Verständnisses ist, dass man heute nach mehreren Jahrzehnten dieser Art von Verkehrsunfallforschung viel über Unfallabläufe und Unfallfolgen, aber nur wenig über die Unfallursachen weiß.“ [Gründl 2005]

Es ist also vielmehr von Bedeutung, die eigentlichen Ursachen der Verkehrsunsicherheit zu identifizieren, als eine reine Symptombekämpfung auszuführen, bzw. eine tiefgreifende Analyse durchzuführen, welchen Effekt getroffene Maßnahmen auf Basis des vorherrschenden Unfallgeschehens tatsächlich erreichen können. Bereits in den sechziger Jahren hat die Veröffentlichung von Nader „Unsafe at any speed“ zu einer gesellschaftlichen Bewusstmachung geführt über die Notwendigkeit von neuen Sicherheitstechnologien im Automobil, bzw. das seitens der Automobilindustrie nicht die erforderlichen Maßnahmen ergriffen worden sind. „Es gibt unschätzbar viele Technologien, die Autos viel sicherer machen könnten“ [Nader 1965]. Die Arbeit von Chase „Still unsafe at any speed“ untermauert die Aussagen von Nader auch für heutige Zeiten, allerdings hat das Werk wesentlich weniger Aufmerksamkeit erlangt [Chase 2009].

Ein entscheidender Aspekt bei der Verbesserung der Sicherheit im Straßenverkehr besteht im Rahmen einer begründeten Maßnahmenauswahl, welche in der Lage ist die bestehenden Problemfelder zu adressieren und die gewünschten Effekte zu erzielen. Bisher wurden zahlreiche Verkehrssicherheitsmaßnahmen implementiert, die Auswirkungen auf einen großen Teil der Verkehrsteilnehmer hatten. Hauptzielgruppe bleiben jedoch weiterhin die motorisierten Verkehrsteilnehmer [Assing et.al. 2010].

1.2 Entscheidungsfindung in der Verkehrssicherheit

Je nach betroffener Verkehrskonstituente liegen unterschiedliche Entscheidungsprozesse hinsichtlich dieser Maßnahmenauswahl zugrunde. Grundsätzlich folgen Entscheidungsprozesse einem prozeduralen Vorgehen, welches wie folgt aussieht:

1. Problemidentifikation
2. Problemanalyse
3. Beurteilung der verfügbaren Handlungsoptionen
4. Auswahl mittels plausibilisierter Kriterien (monetär, technisch, politisch, etc.)
5. Umsetzung der Handlungsoption
6. Erfolgskontrolle [Bouyssou et.al. 2009]

Es gibt eine Reihe von Entscheidungsträgergruppen, die einen Bedarf für ein Modell der Verkehrssicherheit zur Abschätzung der zu erzielenden Wirkung von Maßnahmen aufweisen. Hinsichtlich der Analyse von Entscheidungsprozessen der Verkehrssicherheit ist in der Arbeit von [Hosse et.al. 2012] ein semi-formales Modell einer hierarchischen Regelungsstruktur entwickelt worden, welches die grundlegenden Entscheidungsmechanismen sowie die Entscheidungsträger der Verkehrssicherheit identifiziert, vgl. Abbildung 1-2.

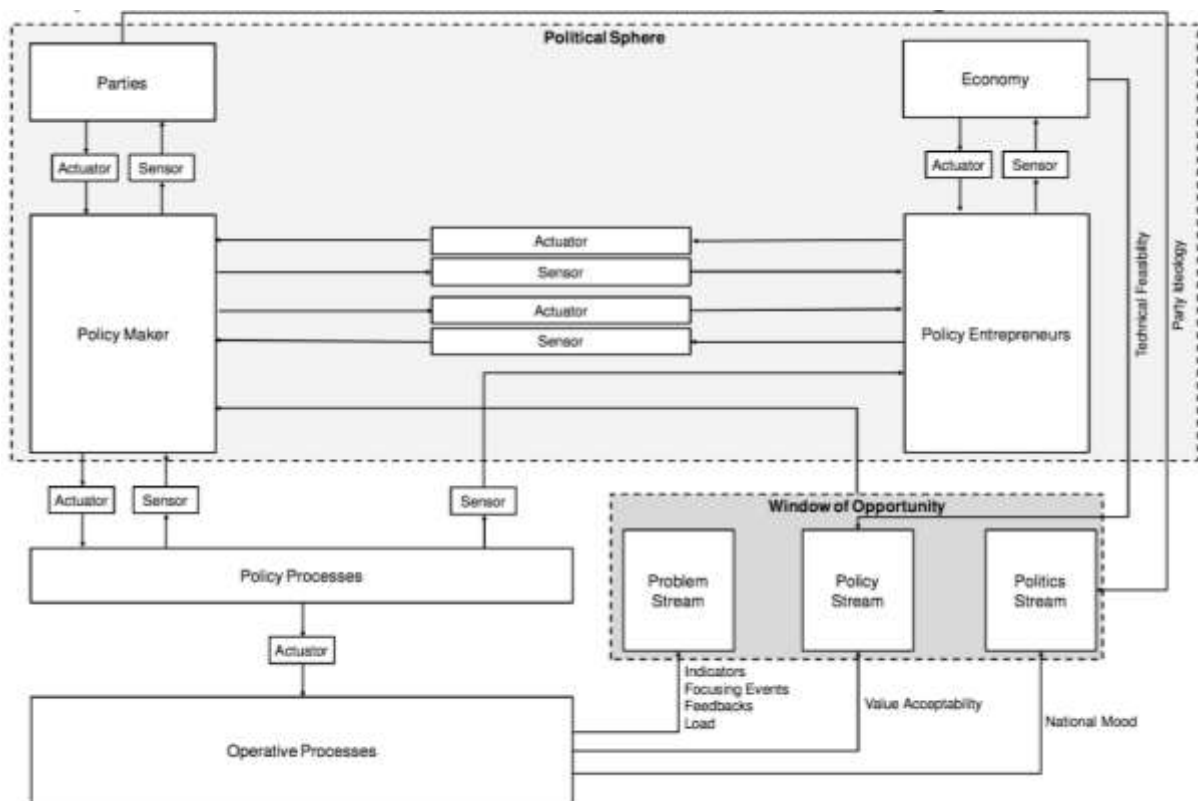


Abbildung 1-2: Prozess der Entscheidungsbildung als Regelungsstruktur, in Anlehnung an [Hosse et.al. 2012]

Auf Grundlage des erarbeiteten systemtheoretischen Modells zum Prozess der Entscheidungsbildung werden im Folgenden die zentralen Entscheidungsträger der Verkehrssicherheit, hier politische Akteure (siehe Abschnitt 1.2.1) und Fahrzeughersteller (siehe Abschnitt 1.2.2), näher betrachtet.

1.2.1 Entscheidungsträger Politik

Wie bereits in Abschnitt 1.1 erläutert, wirken politisch getriebene Maßnahmen im Straßenverkehr besonders effektiv, da diese durchaus sprunghaft auf das Gesamtverkehrsverhalten und damit die Verkehrssicherheit einwirken. Der politische Entscheidungsprozess ist daher von Bedeutung und wird näher betrachtet: Zu Erklärung politischer Entscheidungsprozesse hat sich im Laufe der letzten Jahre der sog. Multiple-Streams-Ansatz (engl.: Multiple Streams Perspective / MSP) in den Politikwissenschaften durchgesetzt. Dieser von [Kingdon 1984] entwickelte Ansatz wird im Politikzyklus dem „*Agenda Setting*“ (auch: Problemthematisierung) eingeordnet. Mittels dieses Modells soll in der Politikfeldanalyse erklärt werden, wie und warum bestimmte Themen auf die politische Agenda gelangen und zu einer politischen Entscheidung führen. Das Modell trifft die Annahme, dass es drei voneinander unabhängige Ströme gibt, beeinflusst von sog. Politikunternehmern und ausgelöst von einem Möglichkeitsfenster (auch: Policy Window), die zu einer politischen Entscheidung führen. Diese drei Ströme sind:

- *Problem-Strom*: Der Problem-Strom fasst jene Zustände zusammen, welche gleichzeitig in einem politischen System gehandelt werden und um eine signifikante Wahrnehmung konkurrieren. Fokussierende Ereignisse oder Feedbacks überführen Probleme zu politisch relevanten Problemen. Beispiele für im Problem-Strom enthaltene Probleme sind z. B. die Atomkatastrophe von Fukushima oder die Volkswagen Diesel-Thematik, welche zu einer aktiven Wahrnehmung in den politischen Diskussionen führt.
- *Politics-Strom (Strom der Entscheidungsprozesse)*: Die Nationale Stimmung, die Machtverteilung der organisierten Interessen oder auch Regierungswechsel beeinflussen den Politics-Strom, welcher sich selbst als Entscheidungsprozess konkretisiert. Hierunter fällt u. A. die Beeinflussung durch Interessensverbände.
- *Policy-Strom (Strom der Lösungsvorschläge)*: Der Policy-Strom besteht aus dem Spannungsfeld zwischen der Durchführbarkeit und der normativen Akzeptanz und bündelt die vorhandenen Handlungsoptionen. Diese Handlungsoptionen werden von sog. Policy-Spezialisten entwickelt (z. B. durch Bürokraten, Wissenschaftler, Ideologen, Stiftungen, etc.). Teilweise werden die Handlungsoptionen unabhängig der Notwendigkeit im Problem-Strom entwickelt, so dass man auch von "*solutions in search of problems*" spricht.

Das MSP-Modell von [Kingdon 1984] verdeutlicht, dass die politische Gestaltung weniger durch einen rationalen Entscheidungsprozess getrieben ist, welchem eine fundierte Problemdefinition vorausgeht, als dass sie vielmehr vom Zufall durch das Möglichkeitsfenster geprägt ist. Die Stärke des Modells wird in der Erklärbarkeit von politischen Entscheidungsprozessen gesehen, insbesondere solcher, die aufgrund irrationaler Entscheidungen getroffen wurden. Diese Art der Entscheidungen wird aufgrund von Ambiguität getroffen. Ambiguität ist zu verstehen als dass der Entscheidungsgegenstand grundsätzlich mehrdeutig wahrgenommen und interpretiert werden kann, primär bestimmt durch das Möglichkeitsfenster [Hosse et. al. 2012]. Der MSP-Ansatz lässt sich ebenfalls auf Entscheidungsprozesse anderer Organisationen (z. B. Automobilhersteller) übertragen und so getroffene Entscheidungen erklären [Herweg 2015].

Betrachtet man die Verkehrssicherheit als Problem-Strom, so gibt es zwar eine Reihe von Politics- und Policy-Strömen, allerdings sind die Möglichkeitsfenster, welche zu einer konkreten und effektiven Entscheidung zur Verbesserung der Verkehrssicherheit führen können, relativ gering. Als die Zahl der Getöteten noch politisch nicht tragbare Ausmaße erreichte, bildeten sich häufiger Möglichkeitsfenster (bspw. Einführung der Promillegrenze aufgrund erhöhter töd-

licher Verkehrsunfälle unter Alkoholeinfluss). Da die Verkehrssicherheit mittlerweile ein akzeptiertes Maß erreicht hat, zeigen sich die wahrgenommenen Probleme eher in anderen Themen, wie der Elektromobilität und der Zulassung von automatisierten Fahrzeugen [Bach 2016] [Schnieder u. Hosse 2018]. In den Arbeiten von [Nader 1965] Anfang der 1960er Jahre wird angemerkt, dass die Automobilindustrie nicht die notwendigen sicherheitsrelevanten Maßnahmen ergreift und damit das erreichbare Potential an Sicherheit nicht ausschöpft. [Hilse u. Schneider 1995] stellten dann 1995 fest: „Angesichts der Bilanzen über Straßenverkehrsunfälle und deren Folgen wird die Verbesserung der Verkehrssicherheit eine zentrale Daueraufgabe der Verkehrspolitik der Europäischen Union sein und bleiben“ (nach [Hilse u. Schneider 1995]). Um folglich die Ergreifung von Verkehrssicherheitsmaßnahmen zu steigern, muss der Problem-Strom (und der Policy-Strom) derart beeinflusst werden, dass einerseits die Probleme von den Entscheidungsträgern als signifikant wahrgenommen werden und andererseits ausreichend begründete Lösungsvorschläge vorhanden sind, die in der Lage sind das Problem hinreichend zu adressieren. Dann genügt ein im Verhältnis zur vorherrschenden Wahrnehmung der Verkehrssicherheit auch kleineres Möglichkeitsfenster (z. B. Stagnierung der Entwicklung der Getöteten) um den Politics-Strom gezielt anzusprechen und zu einer geeigneten Entscheidung zu gelangen.

[Noland 2013] stellt fest, dass es einer Objektivierung der Policy-Entscheidungsfindung mittels modellbasierter Ansätze bedarf. Nur durch eine ausreichend begründete Entscheidungsfindung kann eine effektive Maßnahmenergreifung für die Verkehrssicherheit ergriffen werden.

1.2.2 Entscheidungsträger Fahrzeughersteller

Neben den politischen Akteuren üben die Fahrzeughersteller einen entscheidenden Beitrag zur Ausgestaltung der Verkehrsmittel aus. Hier sind diese maßgebend für die Einführung nicht gesetzlich geforderter Sicherheitsmaßnahmen verantwortlich. Ein Großteil der im Verkehrssystem verfügbaren Sicherheitsmaßnahmen sind auf Basis der Hersteller-Motivation eingeführt worden, ohne dass eine gesetzliche Forderung existiert. Dies zeigt sich u. a. auch daran, dass sich bisher Aspekte der Sicherheit nur geringfügig in den ECE-Regelungen (Economic Commission for Europe) zur Fahrzeugtypgenehmigung finden lassen. Ein Beispiel ist hier die [ECE-R79] (Lenkanlagen), welche eine Anforderung hinsichtlich der Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten fixiert.

Die Problematik bei der Entscheidungsfindung der Hersteller hinsichtlich der Ergreifung von förderlichen Verkehrssicherheitsmaßnahmen liegt primär begründet in der starken Kundenorientierung der Hersteller: Die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Produktportfolios und der Ausstattungsmerkmale der Fahrzeuge ist getrieben von Kundenanforderungen und dem Verhalten der Wettbewerber. Abhängig vom bereitgestellten Angebot der Hersteller wählen Fahrzeugkäufer ihr Produkt auf Basis individueller Präferenzen aus [Bertsche u. Lechner 2006] [Woisetschläger 2007]. Hier sind Aspekte wie Preis, Bekanntheitsgrad des Produktes und u. U. Wirkung von Werbemaßnahmen Einflussfaktoren. Der Erfolg von Verkehrssicherheitsmaßnahmen für Fahrzeuge ist daher maßgeblich abhängig vom Verhalten der Automobilkäufer, insb. der Neuwagenkäufer.

Die Einflussfaktoren auf die Kaufentscheidung der Kunden ist dabei abhängig von Faktoren wie Komfort, Sicherheit, Preis-Leistungsverhältnis, Kaufpreis, Gesamtnutzungskosten, Fahrzeuggröße und Antriebsleistung.

Die Sicherheit des Fahrzeugs stellt dabei nur einen Teil-Aspekt der Kaufentscheidung dar. Demzufolge wird auch seitens der Hersteller nicht ausschließlich der Aspekt der Sicherheit bei der

Ausgestaltung des Produktportfolios fokussiert. Die Fahrzeughersteller stehen bei ihrem Entscheidungsprozess in einem Spannungsfeld zwischen Herstellerambitionen und Kundenerwartungen [Plättner et.al. 2010] [Winner 2009]:

- Die Hersteller sind motiviert Funktionen am Markt anzubieten, welche von den Kunden auch nachgefragt werden. Das heißt die Grenze zwischen einer aktiven Sicherheitsfunktion (z. B. automatischer Bremsassistent) und einem Komfortsystem (z. B. automatische Distanzregelung) wird dem Kunden oftmals nicht so explizit vermarktet. Weiterhin gelten bei Vermarktungsaspekten von Sicherheitsfunktionen evolutionsbedingte Randbedingungen: Sichere Produkte/Fahrzeuge werden oftmals als selbstverständlich wahrgenommen. Sicherheitsaspekte von Fahrzeugen werden von den Kunden oftmals als Grundvoraussetzung für ein Fahrzeug gewertet und weniger als differenzierendes Merkmal [Diez 2015].
- Gleichfalls haben die Kunden eine gewisse Erwartungshaltung an die im Fahrzeug bereitgestellten Funktionen. Zwar haben Verbraucherschutzorganisationen wie die EuroNCAP ihre Sternbewertung als marktweite Marke und Kaufentscheidungsgrundlage etabliert. Entscheidend bei den Kundenerwartungen ist, unabhängig ob es als Komfort- oder Sicherheitsystem geplant ist, dass die versprochene Funktion auch das erfüllt, was die Hersteller proklamieren. Fehlfunktionen oder Fehlauflösungen führen zumeist zu einer sofortigen Ablehnung durch den Kunden [Diez 2015].

Es zeigt sich folglich, dass aus Sicht der Entscheidungsfindung der Fahrzeughersteller die Verkehrssicherheit nur einen Teil-Aspekt bei der Ausgestaltung der Fahrzeuge abbildet.

1.3 Problemstellung der Arbeit

Bisher fehlt ein quantifizierter Ansatz, welcher den erwarteten Effekt von Verkehrssicherheitsmaßnahmen auf die Auswirkungen im Gesamtverkehrssystem abbildet. Die verfügbaren Modelle der Verkehrssicherheitsprognose zeigen hinsichtlich der Abbildbarkeit der komplexen Zusammenhänge des Verkehrssystems signifikante Schwächen auf. [Elvik 2014] stellt fest:

“The current basis for modelling interdependencies between road safety measures, meaning that the effect of a measure depends on whether another road safety measure is used or not, is very weak.” [Elvik 2014, S. 35]

Die Hersteller wenden aktuell sog. Wirkungsanalysen an, welche auf Basis simulativer Verfahren die Effizienz von Verkehrssicherheitsmaßnahmen quantitativ bewerten, vgl. Abschnitt 4.5. Diese Wirkungsanalysen sind wiederum zumeist auf eine geringe Anzahl von Fahrzeugtypen reduziert und dienen neben der Bewertung der Sicherheit ebenfalls der Steigerung der Effizienz nicht sicherheitsrelevanter Maßnahmen. Dennoch ist es insbesondere im Hinblick auf eine plausibilisierte Entscheidungsfindung der politischen Akteure und der Fahrzeughersteller empfehlenswert ein Verfahren zur Prognose der Verkehrssicherheit zur Verfügung zu haben, welches in der Lage ist die Wirkung von Sicherheitsmaßnahmen auf das gesamte Verkehrssystem zu evaluieren und zu prognostizieren. [Elvik 2014] hebt hervor, dass ein gutes Prognosemodell ebenfalls betrachtet, wie sich die Verkehrssicherheit entwickelt, ohne dass die relevanten Verkehrssicherheitsmaßnahmen eingeführt werden [Elvik 2014]. Zumal ist die gelebte Praxis in der Verkehrsunfallforschung, dass die Wirkung von Sicherheitsmaßnahmen erst nach der Einführung der Maßnahme evaluiert wird [Appel et.al. 2005]. Weiterhin existiert kein Verfahren, welches in der Lage ist neben rein technischen Maßnahmen ebenfalls nicht-technische Maßnahmen quantitativ zu evaluieren und diesen Aspekt auf eine makroskopische Ebene zu transportieren, um so

das Gesamtsystemverhalten darzustellen. Daher behandeln bisherige Forschungsaktivitäten die kurz- bis langfristigen Wirkungsketten der Straßenverkehrsentwicklung weitestgehend disziplinär [Elvik et.al. 2009]. Die Straßenverkehrsentwicklung wird je aus konstitutioneller Sicht erforscht:

- die *Verkehrsinfrastrukturforschung* betrachtet diese disziplinär [DVR 2010],
- wie ebenso die Gestaltung und die Konzepte der Straßenfahrzeuge primär aus Sicht der *Konstruktions- und Fertigungstechnik* abgehandelt werden [Maurer et.al. 2015],
- wirtschaftliche Fragestellungen und Aspekte werden von der *Verkehrsökonomie* bearbeitet [Ahrens et.al. 2011] [Stock 2014] und
- Problemstellungen der politischen Steuerung werden mit Hilfe der *Politikwissenschaft* behandelt [Hosse et.al. 2013].

Nur wenige Fachdisziplinen erarbeiten gegenwärtig eine inter-, bzw. transdisziplinäre Arbeitsweise, wie beispielsweise die Psychologie [Schlag 2004] [Vanderbilt et.al. 2009] [Martens 2011] [Vester 2011] [Vollrath et.al. 2015] [Vogelpohl 2016].

Diese transdisziplinäre Sichtweise gewinnt umso mehr an Bedeutung, seitdem steigende Automatisierungsgrade im Straßenverkehr Einzug halten und es zu einer immer größer werdenden Komplexität und Vernetzung der Verkehrsmittel kommt. Wie [Assing et.al. 2010] feststellt, muss „(...) die Verkehrssicherheitsarbeit (...) sich weiterhin der Aufgabe stellen, auf lange Sicht einen sicheren Verkehr zu gewährleisten und damit eine Basis für nachhaltige Mobilität zu bilden“ [Assing et.al. 2010]. Um weiterhin für eine gute Verkehrssicherheit zu sorgen und den bereits hohen Grad an Verkehrssicherheit zu erhalten und zu verbessern, bedarf es eines ganzheitlichen Modells, welches zu ergreifende Maßnahmen abbildet und deren Effekt plausibel prognostiziert [Eenik et.al. 2005]. Allerdings haben bisher Verkehrssicherheitsprognosemodelle wenig bis gar keinen Effekt auf gestalterische Entscheidungsprozesse der Entscheidungsträger ausgeübt. Als primäre Ursache für den geringen Einfluss der Modelle sieht [Armstrong et.al. 2015], dass die Anwender selten auf systemische Modellkonzepte zurückgreifen. Weiterhin werden die verwendeten Prognosemodelle bereits mit einem Zielergebnis/Erwartungspräferenz seitens des Auftraggebers motiviert. Dies mindert die Akzeptanz der Aussagen und die Motivation aus den Ergebnissen zu lernen [Armstrong et.al. 2015]. Es gibt daher bisher keinen akzeptierten modellbasierten Ansatz, welcher in der Lage ist, die Fragestellung der Verkehrssicherheitsprognose ausreichend transdisziplinär zu betrachten.

1.4 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Bei der Erstellung der Verkehrssicherheitsmodelle ist kritisch festzuhalten, dass jede Fachdisziplin ihre eigene Sicht mit spezifischen Methoden, Konzepten, Modellen und Terminologien entwickelt. Eine Verbindung der disziplin-spezifischen Modelle zur Schaffung eines systemischen Modells der Verkehrssicherheit ist zwar im Einzelfall erkennbar, beschränkt sich jedoch auf informelle Ansätze. Eine weitergehende methodische und theoriegeleitete transdisziplinäre Integration bis hin zur Nutzung neuartiger integrationsfähiger Metamodelle ist nicht vorhanden [Bertin 2010] und soll daher die Zielsetzung dieser Dissertation darstellen. Die Entstehung von Sicherheit im Straßenverkehr ist als Resultat eines komplex emergenten Wirkgeflechts in Form kaskadierter Regelkreise zu verstehen [Davis et.al. 2014] [Schnieder 2016] und durch geeignete Modellkonzepte der Systemtheorie aggregiert zu modellieren und zu beschreiben [Dekker et.al. 2011] [Leveson 2011]. Die Ziele sind im Einzelnen:

- (1) Identifikation und Qualifizierung von Beschreibungsmitteln mit konkreten Modellen und Modellkonzepten, welche zur maßnahmenabhängigen Prognose der Verkehrssicherheit genutzt werden können,
- (2) Entwicklung einer Methode/eines Verfahrens und von Modellen zur Prognose der Verkehrssicherheit (hier eine sog. Wirkfeld-Prognose, vgl. Abschnitt 1.5) unter Berücksichtigung von möglichen Maßnahmen seitens der Verkehrsmittel, Verkehrsobjekte, Verkehrswegeinfrastruktur und Verkehrsorganisation,
- (3) exemplarischer Aufbau einer Wirkfeld-Prognose der Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung benannter Maßnahmen,
- (4) Analyse ebendieser Handlungsoptionen und Identifikation von Implikationen für die Entscheidungsträger Politik und Fahrzeughersteller.

Die aus dem Modell zu erwartenden Erkenntnisse werden ein Verständnis über Systemmechanismen und Rückkopplungseffekte getroffener Maßnahmen auf die Sicherheit im Straßenverkehr liefern und eine Priorisierung erforderlicher Handlungsfelder für Entscheidungsträger schaffen. Mittels der bereitgestellten begründeten Prognose von Handlungsoptionen und Instrumenten lässt sich folglich eine Optimierung der politischen, wie auch herstellerseitigen Entscheidungsprozesse herbeiführen.

Um eine dedizierte Trennung der verschiedenen Verkehrssicherheitsmaßnahmen vorzunehmen, bietet sich zur Abgrenzung das Modell der Risikogenese an, siehe Abbildung 1-3.

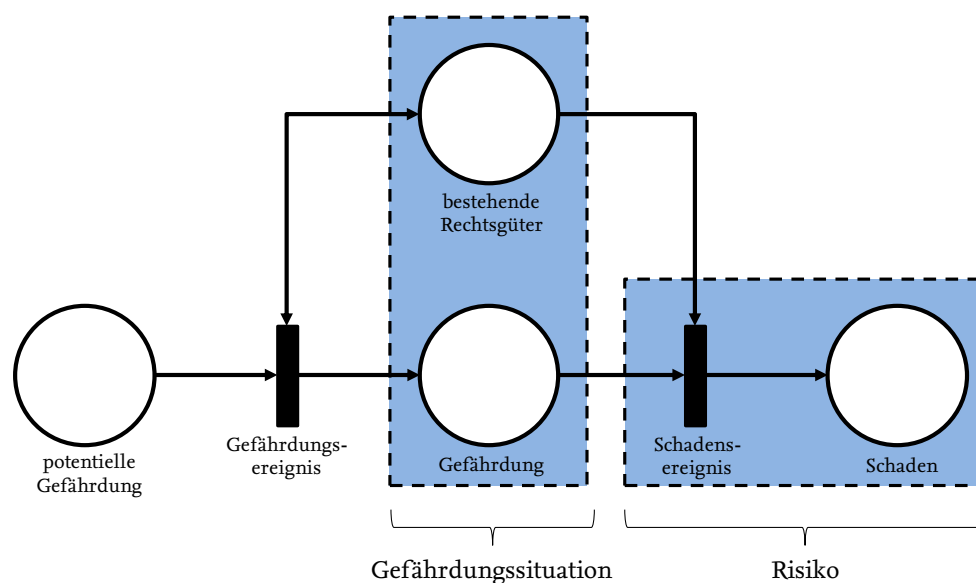


Abbildung 1-3: Modell der Risikogenese, in Anlehnung an [Schnieder u. Schnieder 2014]

Die Verkehrssicherheit ist im Modell der Risikogenese ein Eigenschaftsattribut des Verkehrssystems, welches wiederum in verschiedene globale Zustandsübergänge unterteilt werden kann. Trifft eine potentielle Gefährdung räumlich auf ein bestehendes Rechtsgut, so tritt das Gefährdungsereignis ein. Die Gefährdung in Kombination mit dem bestehenden Rechtsgut stellt die Gefährdungssituation dar. Sobald es zum physischen Kontakt zwischen Gefährdung und bestehendem Rechtsgut kommt, tritt das Schadensereignis ein und das System nimmt den globalen Zustand des Schadens ein. Die Kombination aus Schadensereignis und dem Schadenszustand bildet das Risiko. Die Arbeit setzt den Fokus auf Verkehrssicherheitsmaßnahmen, welche unfallvermeidend (proaktiv) und schadensschweremindernd (passiv) auf das Verkehrsgeschehen einwirken [Winner 2009]. Entsprechend dem Modell der Risikogenese werden im Rahmen dieser

Arbeit Maßnahmen betrachtet, welche in der Lage sind einerseits die Rate der Schadensereignisse hinsichtlich der Eintrittshäufigkeit, aber auch der Schadensschwere zu verringern.

Weiterhin wird das klassische Verständnis hinsichtlich aktiver und passiver Verkehrssicherheitsmaßnahmen erweitert, indem die Abgrenzung nicht ausschließlich technische Maßnahmen betrachtet, sondern auch politische, soziale und organisatorische Verkehrssicherheitsmaßnahmen. Die Abgrenzung der Arbeit ergibt sich aus dem in Abbildung 1-4 dargestellten Zusammenhang.

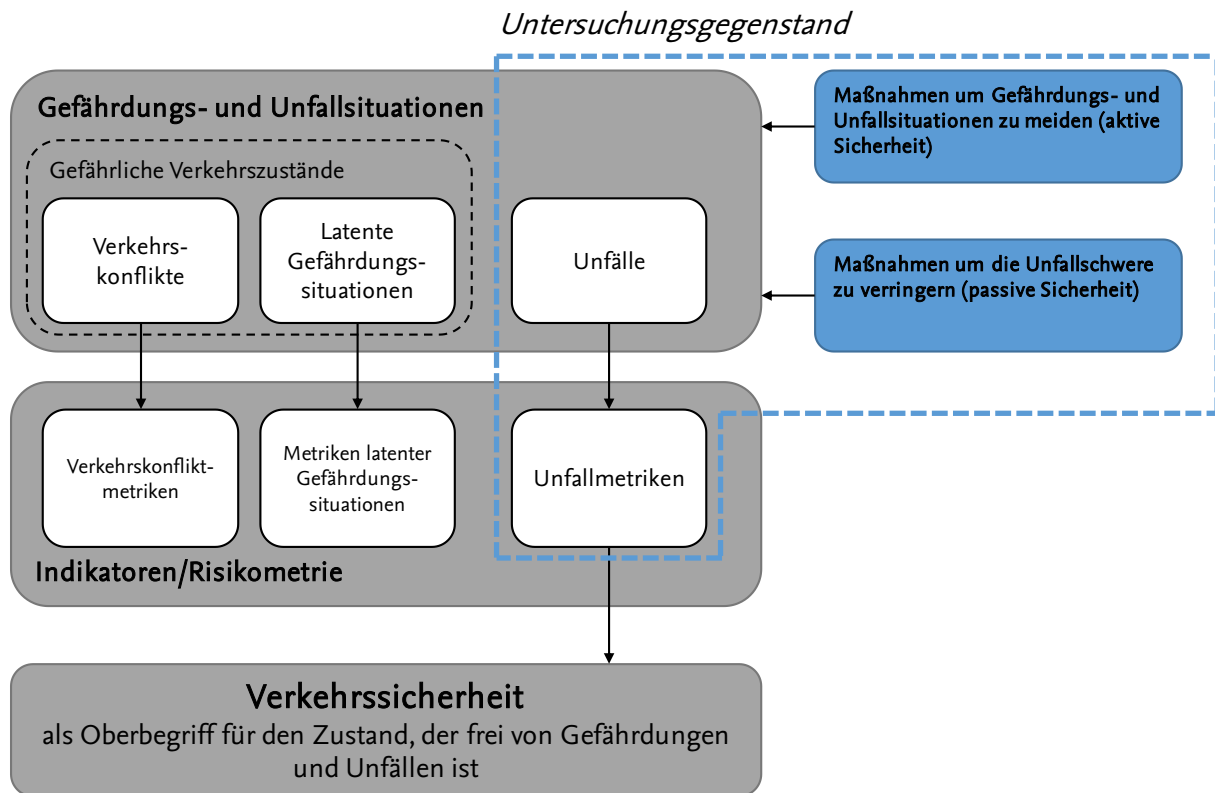


Abbildung 1-4: Abgrenzung dieser Arbeit, in Anlehnung an [Maier et.al. 2006]

Nicht im Fokus stehen anderweitige Verkehrsgütekriterien, wie z. B. Verkehrsflussindikatoren. Weiterhin grenzt sich die Arbeit ab, nicht zum Unfall führende Verkehrskonflikte oder latente Gefährdungssituationen, sog. Beinahe-Unfälle (vgl. hierzu [Bock 2016]), in die Betrachtung einzubeziehen. Da das Konzept der hier zu entwickelnden Wirkfeld-Prognose bisher nicht existiert, wird dieses im folgenden Abschnitt näher erläutert.

1.5 Konzept der Wirkfeld-Prognosen

Zentraler Aspekt der zu entwickelnden modellbasierten Prognose der Verkehrssicherheit stellt eine sog. Wirkfeld-Prognose¹ dar. Das Konzept der Wirkfeld-Prognosen sieht zwei Kernaspekte der Prognose vor:

1. Prognosemodell

¹ Der Begriff der Wirkfeld-Prognose wird im Rahmen dieser Arbeit eingeführt.

Das Prognosemodell einer Wirkfeld-Prognose muss in der Lage sein auf Basis vom vergangenen Verkehrssystemverhalten, hier kommen diese Informationen aus einer Unfalldatenbank, das zukünftige Verhalten des Verkehrssystems unter Einfluss einer erwarteten positiven (oder negativen) Wirkung einer Sicherheitsmaßnahme zu bestimmen.

2. Wirkungsmodell

Auf Basis eines zu erstellenden Maßnahmenkatalogs wird ein quantifiziertes Maß, hier das Sicherheitspotential, für eine Maßnahme in einem bestimmten Wirkfeld bestimmt. Dieses quantifizierte Maß wird an das Prognosemodell gegeben

Das grundlegende Konzept der Wirkfeld-Prognosen ist in folgender Abbildung 1-5 dargestellt.

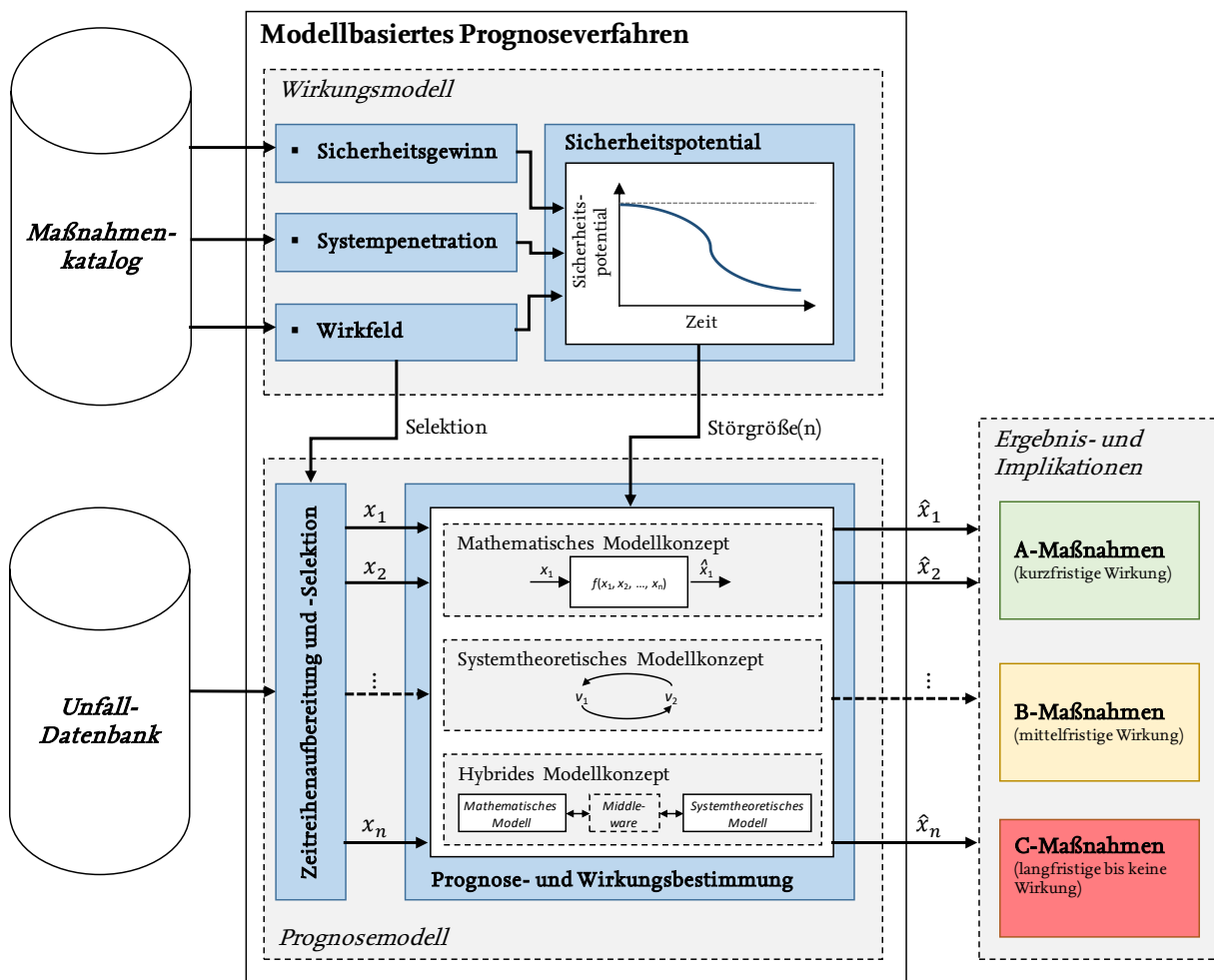


Abbildung 1-5: Konzept der Wirkfeld-Prognose

Die Ergebnisse der modellbasierten Prognose der Verkehrssicherheit bewerten den Effekt von Maßnahmen und dienen folglich als Unterstützung im Entscheidungsprozess für die relevanten Akteure. Hierbei kann eine Differenzierung der sicherheitsförderlichen Wirkungen hinsichtlich kurzfristiger, mittelfristiger und langfristiger bis keiner Wirkung vorgenommen werden. Die formale Definition der Wirkfeld-Prognose wird ausführlich in Kapitel 6 und die exemplarische Anwendung in Kapitel 7 dargelegt.

1.6 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit unterteilt sich in sieben Kapitel, während die Einleitung in *Kapitel 1* und die Zusammenfassung in *Kapitel 9* den Rahmen der Arbeit bilden (vgl. Abbildung 1-6), konzentrieren sich die *Kapitel 1* bis *8* auf die Bearbeitung der formulierten Zielsetzung:

- *Kapitel 2* erarbeitet die Einflussfaktoren auf die Straßenverkehrssicherheit. Hier werden im Detail technische, menschliche, institutionelle und marktwirtschaftliche Einflüsse auf die Verkehrssicherheit dargestellt. Es ergibt sich hieraus weiterhin die Notwendigkeit einer Multidisziplinarität zur Beantwortung der Zielsetzung.
- *Kapitel 3* legt die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit dar, um die Zielsetzung zu erarbeiten. Es wird hierbei vorgestellt, dass die Arbeit nach einem V-Modell vorgeht.
- *Kapitel 4* zeigt den Stand der Forschung zu den verfügbaren Prognoseverfahren zur Verkehrssicherheit auf. Nachdem der Begriff der Prognose definiert ist und die grundlegende Problematik von Prognosen erläutert ist, werden datenbasierte und modellbasierte Prognoseverfahren vorgestellt. Weiterhin werden Wirkungsanalysen betrachtet. Das Kapitel endet mit Schlussfolgerungen für die Konzeption des Prognoseverfahrens.
- *Kapitel 5* zeigt den Stand der Forschung zu den bekannten Modellkonzepten zur Verkehrssicherheitsprognose. Es findet ein Abriss verschiedener Systemtheorien statt und es wird auf Sicherheitsmodellkonzepte sowie regelungstechnische und systemdynamische Modellkonzepte eingegangen. Das Kapitel endet mit Schlussfolgerungen für die Konzeption des Prognoseverfahrens.

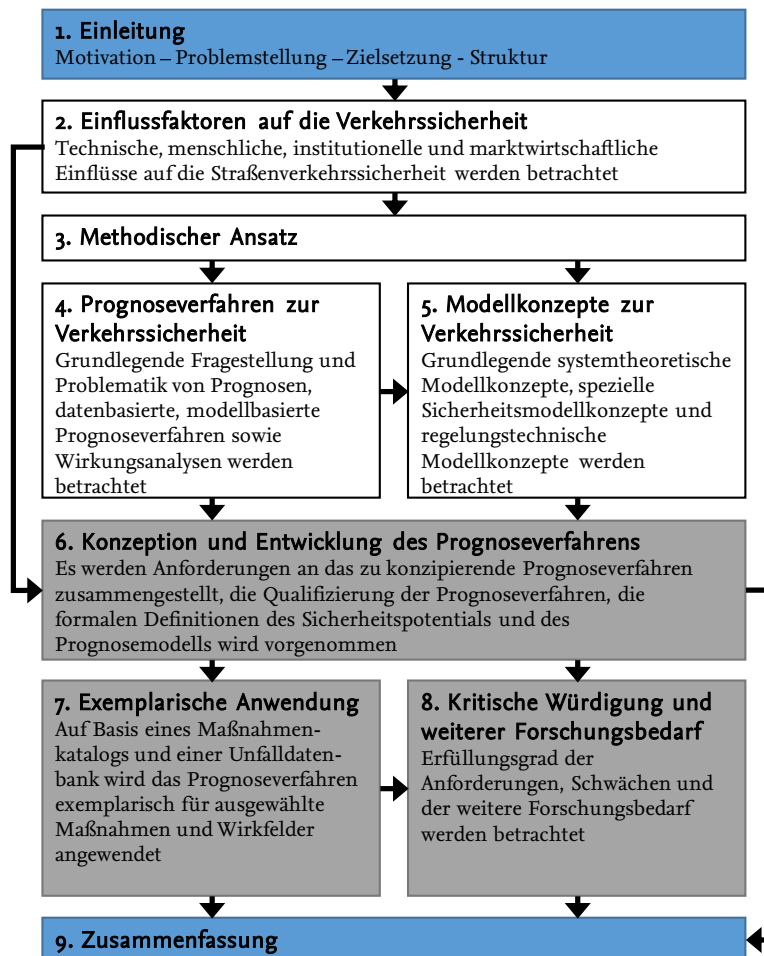


Abbildung 1-6: Struktur und Aufbau der Arbeit

- *Kapitel 6* führt die Konzeption und Entwicklung des Prognoseverfahrens durch. Das Kapitel 6 fasst die in den vorhergehenden Kapiteln identifizierten Anforderungen an das Prognoseverfahren zusammen. Weiterhin erfolgt eine Qualifizierung der verfügbaren Prognoseverfahren in einer vereinfachten exemplarischen Wirkfeld-Prognose. Nach Auswahl eines geeigneten Prognoseverfahrens werden das Sicherheitspotential für Verkehrssicherheitsmaßnahmen und das konkrete Prognosemodell formal definiert.
- *Kapitel 7* wendet das zuvor definierte Prognoseverfahren exemplarisch auf Basis eines Maßnahmenkatalogs und einer Unfalldatenbank an und prognostiziert das erwartete Unfallaufkommen für eine Reihe repräsentativer Wirkfelder unter Einfluss relevanter Verkehrssicherheitsmaßnahmen.
- *Kapitel 8* führt die Prüfung der Anforderungen durch und validiert das Prognoseverfahren. Es werden weiterhin grundlegende Schwächen und der weitere Forschungsbedarf dargelegt.

1.7 Vorarbeiten am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik

Eine Reihe relevanter Vorarbeiten vom Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik dienen als Grundlage für diese Arbeit. Folgend werden ausgewählte Forschungsarbeiten aus den Bereichen der Gesetzesfolgenabschätzung, der Verkehrssicherheit und der Terminologie kurz vorgestellt und deren Zusammenhang zu dieser Arbeit dargelegt.

Forschungsschwerpunkt Gesetzesfolgenabschätzung

Die Dissertation von [Wansart 2012] zum Thema „*Analyse von Strategien der Automobilindustrie*“ stellt eine erste Forschungsarbeit des Instituts im Bereich der Gesetzesfolgenabschätzung dar und nutzt systemtheoretische Modellierungsmethoden, um den Automobilmarkt mit seinen beteiligten Akteuren aus marktwirtschaftlicher Sicht zu analysieren:

„Der akademische Neuheitsgrad ergibt sich zum einen aus seinem systemdynamischen Modellierungsansatz des Automobilmarktes, der eine theoriekonforme Kombination diskreter Auswahlmodelle auf Basis der „Discrete Choice-Theorie“ mit kontinuierlichen Diffusionsmodellen zur Abbildung eines Angebotsabhängigen und zeitvariablen Kundenverhaltens ermöglicht, und zum anderen aus der problemadäquaten Abbildung der komplexen kalifornischen Gesetzgebung und der hierauf basierenden Fallstudie.“ nach [Wansart 2012]

Anwendungsbeispiel der entwickelten Methode zur modellbasierten Gesetzesfolgenabschätzung ist die kalifornische Gesetzgebung zum CO₂-Flottenmanagement und damit einhergehend die Optimierung des Antriebsstrangportfolios der Hersteller mit dem Ziel der Erreichung der CO₂-Vorgaben. Insofern wurde von [Wansart 2012] mittels einer integrativen Modellhybridisierung eine mesoskopische Wirkungsanalyse für Policy-Maßnahmen (vgl. Abschnitt 2.3.1) entwickelt. Der Ansatz wird weiterhin von Herstellern zur Strategieanalyse des Fahrzeugportfolios genutzt und hat im Rahmen international anerkannter Konferenzen und Zeitschriften Anerkennung gefunden [Wansart 2012]. Die Arbeiten von [Wansart 2012] flossen in weitere Forschungsarbeiten ein, z. B. nutzt [Kieckhäfer 2013] verfeinerte Modellkonzepte zur Gesetzesfolgenabschätzung. Die Arbeit von [Wansart 2012] schafft somit methodisch und strukturell eine Grundlage für diese Arbeit.

Forschungsschwerpunkt Verkehrssicherheit

Die Dissertation von [Drewes 2009] zum Thema „*Verkehrssicherheit im systemischen Kontext*“ entwickelt die systemtheoretischen Grundlagen der Systemsicherheit und spezialisiert diese für den Betrachtungsgegenstand der Verkehrssicherheit. Die Arbeit entwickelt ausgehend von konsistenten Begriffsmodellen eine Theorie der Systemsicherheit und verbindet diese mit Sicherheitsimplementierungskonzepten:

„Systematische Implementierungskonzepte zur gezielten Beeinflussung der Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung der Effizienz werden anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele und entwickelter Methoden ausführlich beschrieben und deren Einordnung in einen zuvor geschaffenen Gesamtsystemkontext erläutert.“ nach [Drewes 2009]

Die Forschungsarbeit von Drewes zeigt, inwieweit die Nutzung formaler Beschreibungsmittel zur Risikoanalyse von sicherheitsrelevanten Systemen einen Mehrwert liefert und mittels des geschaffenen Grundlagenverständnisses zur Verkehrssicherheit methodisch unterstützt werden kann. Die von [Drewes 2009] verwendete Risikoanalyse *ProFunD* ist vom Institut im Rahmen des EU-Projekts SELCAT und in der Arbeit von [Slovák 2007] erarbeitet und im Nachgang international in der DIN EN 62551 harmonisiert worden. Die Methode modelliert Verkehrssysteme nach ihren Verkehrsprozessen (Pro), deren steuernden und regelnden Funktionalitäten (Fun) und der Verlässlichkeit (D für Dependability) der Funktionalität. Die Verlässlichkeit wird hier als integrativer Begriff der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit einer Funktion verstanden. Die zentralen Inhalte der Arbeit von [Drewes 2009] schaffen das systemtheoretische Grundverständnis über Verkehrssicherheit, dass im Rahmen dieser Arbeit Anwendung findet und sich in der Definition der Verkehrssicherheit als regelungstechnische Aufgabe wiederfindet.

In dem aktuell laufenden Promotionsvorhaben von Buxhoeveden (vgl. hierzu [Buxhoeveden u. Becker 2016]), werden die in *ProFunD* erforderlichen Zustandsübergangsraten auf Basis eines statistischen Ansatzes erarbeitet und umfassend beschrieben, siehe Abschnitt 4.3.4. [Buxhoeveden u. Becker 2016] liefert damit einen Ansatz, die erforderlichen Übergangsraten für die Zustandsereignisse auf Basis eines anerkannten Verfahrens empirisch zu belegen. Somit ist es ebenfalls möglich das Modell der Risikogenese (siehe Abschnitt 1.4) mittels empirisch belegter Daten zu parametrieren.

Forschungsschwerpunkt Terminologie

Die Dissertation von [Schnieder 2009] zum Thema „*Formalisierte Terminologien technischer Systeme und ihrer Zuverlässigkeit*“ legt den Grundstein mit der entwickelten Methode zu einer widerspruchsfreien Terminologie im Rahmen der Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme. Mit Hilfe der domänenunabhängigen Methode wird von [Schnieder 2009] daraufhin ein formalisiertes Terminologiegebäude zur Beschreibung der Verlässlichkeit technischer Systeme entwickelt.

Dieses Terminologiegebäude stellt eine Präzisierung des Sicherheitsbegriffs von ingenieurswissenschaftlichen Systemen dar und beschreibt dediziert, wie terminologisch der Systembegriff von den Systemzuständen und Ereignissen als elementare Systemeigenschaften hin zu dessen Systemstruktur und Systemverhalten als emergente Eigenschaften überführt werden kann. Die von Schneider geleistete Forschungsarbeit schafft damit den Rahmen zur Induzierung von Verkehrssicherheitsmaßnahmen, zu definieren als Einzelereignisse im Verkehrssystem, hin zu dem Gesamtsystemverhalten, speziell der emergenten Eigenschaft der Verkehrssicherheit, vgl. Ab-

schnitt 5.4. Die Arbeit von Schnieder fand im Rahmen nationaler und internationaler Standardisierungsgremien hohe Anerkennung und wurde schließlich seitens des Instituts in das Tool *iglos* als praxisorientierte Anwendungsplattform entwickelt.

Der Forschungsschwerpunkt der Terminologie hat schließlich seine Veredlung in der Habilitation von [Müller 2015] gefunden, in dem das Themenfeld der Terminologie technischer Systeme vollumfänglich erarbeitet und abgeschlossen worden ist.

2 Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit

“Sicher ist, dass nichts sicher ist. Selbst das nicht.”

(u.a. Joachim Ringelnatz)

Die Verkehrskonstituenten verfügen über eine Reihe von Maßnahmen, um das Verkehrssicherheitsgeschehen zu beeinflussen. Diese Maßnahmen können auch als Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit bezeichnet werden. Eine Strukturierung der Einflussfaktoren lässt sich nach dem von [Schnieder 2014] vorgestellten Prinzip zur *Zuordnung von Phasen, Funktionen und Ressourcen zu Gefährdungsquellen und Schadenssenken von Verkehrskonstituenten* vornehmen (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Zuordnung von Gefährdungsquellen zu Phasen, Funktionen, Ressourcen und Schadenssenken im Verkehrssystem, nach [Schnieder u. Schnieder 2013]

Gefährdungsquelle	Phasen			Funktion				Ressource			Schadenssenke			
	Verhinderung	Abwehr	Minderung	Steuerung	Überwachung	Regelung	Logischer Ausschluss	Mensch	Technik	Institution	Verkehrssubjekt	Verkehrsmittel	Verkehrswegeinfrastruktur	Verkehrsorganisation
Verkehrssubjekt	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>						+		+	+	o	
	<i>k</i>	<i>k</i>	<i>k</i>	<i>k</i>			<i>k</i>		+		+	+	o	
											+	+	+	o
	<i>i</i>			<i>i</i>			<i>i</i>	+		+		o		+
Verkehrsmittel	<i>m</i>		<i>m</i>		<i>m</i>				+		+	+	+	
	<i>k</i>	<i>k</i>	<i>k</i>	<i>k</i>			<i>k</i>		+		+	+	+	
	<i>e</i>		<i>e</i>	<i>e</i>	<i>e</i>	<i>e</i>			+		+	++	+	o
		<i>i</i>			<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	+	+	+	o	(+)	+	+
Verkehrswegeinfrastruktur	<i>m</i>			<i>m</i>					+		o	+	+	
	<i>k</i>		<i>k</i>	<i>k</i>					+		o	+	+	
	<i>e</i>		<i>e</i>						+		o	++	+	o
		<i>i</i>		<i>i</i>				+	+	+		+		+
Verkehrsorganisation														+
								o	o		o	o	o	+
		<i>e</i>		<i>e</i>	<i>e</i>	<i>e</i>	<i>e</i>	o	+		o	o	o	+
	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	+	+	+	+	+	+	+

mit:

- m* materiell (stofflich),
- k* konstruktiv (gestalterisch),
- e* energetisch (wirkungsspezifisch),
- i* Informationsaustausch durch Zeichen/Schilder/EDV,
- o* schwacher positiver Einfluss auf die Sicherheit,
- +* starker positiver Einfluss auf die Sicherheit,
- ++* sehr starker positiver Einfluss auf die Sicherheit

Ausgehend von den Gefährdungsquellen, hier die vier Verkehrskonstituenten, können die Einflussfaktoren in die wirkende Phase, die Art der Funktionalität, die erforderliche Ressource und die adressierte Schadenssenke gegliedert werden. Abhängig von der Phase, Funktion und Ressource lassen sich verschiedenstarke Zusammenhänge des Einflusses zwischen Gefährdungsquelle und Schadenssenke herstellen. Die Gefährdungsquellen sind hier zu verstehen als diejenigen Konstituenten, von denen eine potentielle Gefährdung des sicheren Verkehrsgeschehens ausgeht. Die Schadenssenken erfahren wiederum ausgehend von den Gefährdungsquellen die Schädigung.

Dieses Kapitel betrachtet die Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit von technischen Ressourcen als Gefährdungsquelle (siehe Abschnitt 2.1), von menschlichen Ressourcen als Gefährdungsquelle (siehe Abschnitt 2.2), von institutionellen Ressourcen als Gefährdungsquelle (siehe Abschnitt 2.3) und von marktwirtschaftlichen Ressourcen als Gefährdungsquelle (siehe Abschnitt 2.4). Hierbei ist von besonderem Interesse, inwieweit die Verwendung einer bestimmten Ressource zu einer Schaffung von Gefährdungsquellen führt, wohingegen die Motivation der Einführung eine Förderung der Sicherheit intendiert. Dieses Kapitel endet mit den Schlussfolgerungen aus den Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit, siehe Abschnitt 2.5.

2.1 Technische Ressourcen als Gefährdungsquellen

2.1.1 Verkehrsmittelseitige Einflussfaktoren

Im Rahmen der Forschungsarbeiten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aus dem Jahr 2006 wurde das Sicherheitspotential aktiver und passiver technischer Maßnahmen in Verkehrsmitteln erforscht. Das Sicherheitspotential, hier zu verstehen als das inhärente Potential einer technischen Maßnahme Unfälle im relevanten Wirkfeld zu mindern, wurde in der Studie mittels einer Expertenbefragung (Delphi-Prognose) bis ins Jahr 2020 prognostiziert, vgl. Abbildung 2-1. Die Kernaussage der Studie hält fest, dass wenig Potential in den passiven technischen Maßnahmen gesehen wird, sondern eher eine Förderung der aktiven Maßnahmen erfolgen muss [DVR 2006] [Freyman 2003]. Die aktuelle Marktentwicklung zur Einführung der in der BASt-Studie benannten aktiven und passiven Maßnahmen hängt wiederum hinterher, bzw. weicht von den ursprünglich in 2006 getätigten Aussagen ab. An dieser Stelle ist von Bedeutung, inwieweit technische Maßnahmen einen positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit ausüben.

Die herstellerseitige Motivation zur Einführung von aktiven, technischen Maßnahmen zur Unfallvermeidung zielt in erster Linie darauf ab die Schwächen des menschlichen Fahrers auszugleichen und eine technische Ressource bereitzustellen, welche besser ist als der Mensch in der Fahrzeugführung [Vollrath u. Briest 2008]. „Ziel der Fahrerassistenz ist es, den Fahrer nach dessen Regeln und Erwartungen in der Erfüllung seiner Fahraufgaben zu unterstützen. Bei si-

cherheitssteigernden Fahrerassistenzsystemen besteht die Aufgabe in der Erkennung von kritischen Verkehrssituationen und in einer adäquaten Reaktion auf die erkannte Gefährdung“ (nach [Wiltshko 2004]).

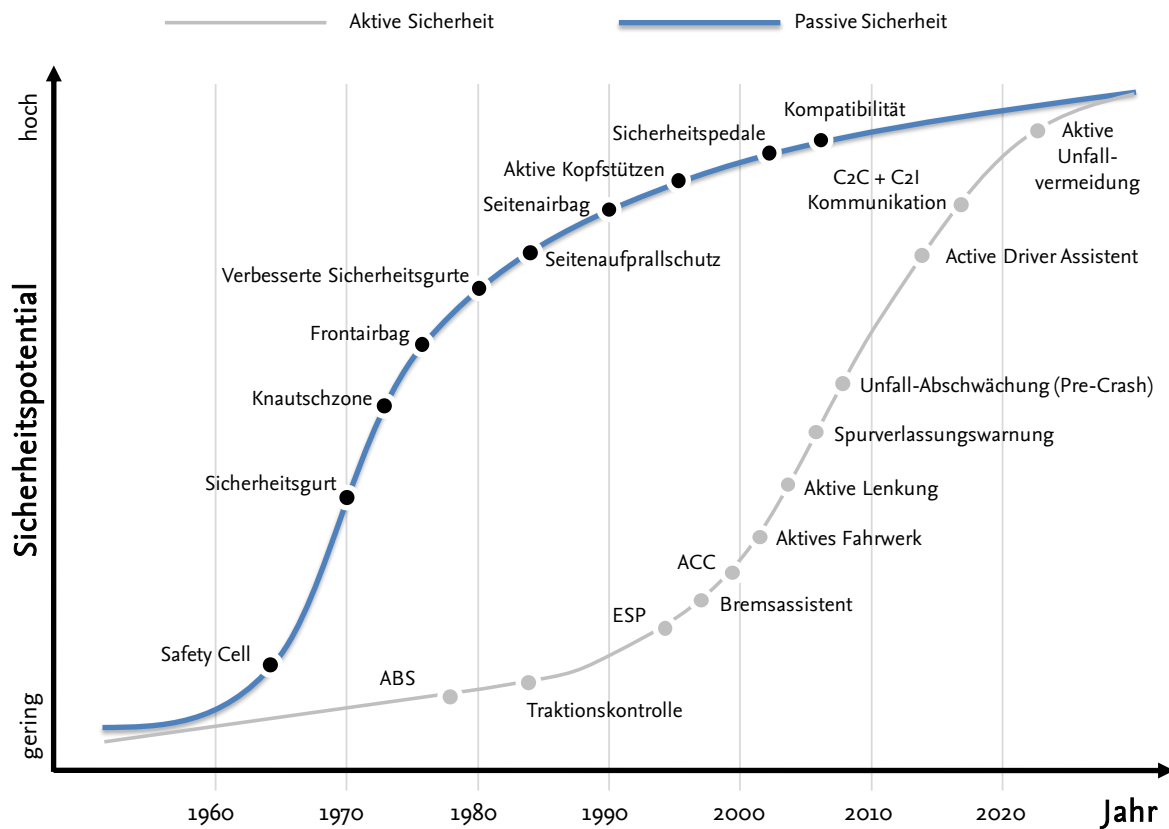


Abbildung 2-1: Geschätztes Sicherheitspotential aktiver und passiver verkehrsmittelseitiger Maßnahmen, in Anlehnung an [DVR 2006]

So werden aktive Sicherheitssysteme allgemein unter dem Begriff Fahrerassistenzsysteme (FAS) verortet, allerdings inkludieren FAS begrifflich neben den aktiven Sicherheitssystemen auch Komfortsysteme, welche zwar zur Entlastung des Fahrers beitragen sollen, wiederum jedoch nicht primär der Erhöhung der Sicherheit dienen [Gründl 2005]. Abhängig vom Unterstützungsgrad oder heute auch zu verstehen als Automatisierungsgrad, hat der Fahrer weiterhin die Aufgabe das FAS zu überwachen und ggf. einzugreifen. Hier wurde seitens der Society of Automotive Engineers (SAE) eine international harmonisierte Definition der Automatisierungsgrade getroffen, welche deklariert, dass eine fahrerseitige Überwachung erst ab einem Automatisierungslevel 3 nicht mehr gewährleistet werden muss [SAE J3016]. Level 3 Systeme sind bisher allerdings noch nicht auf dem Markt erhältlich, bzw. können aufgrund der fehlenden ECE-Regelungen noch nicht zugelassen werden [Audi 2017] [Schnieder u. Hosse 2015]. Die aktuell technisch mögliche Verschiebung der Aufgabe des Fahrers von primär reaktiven auf kognitive Prozesse der FAS-Überwachung stellt nicht automatisch eine Verringerung des Aufwands für den Fahrer dar. Aktuelle Forschungsarbeiten verdeutlichen, dass mit einer deutlichen Erhöhung der Reaktionsdauern zu rechnen ist [Krems u. Vollrath 2011]. Wie belastend diese Überwachung für den Fahrer ist, hängt davon ab, wie gut die Schnittstelle zwischen dem Verhalten des Fahrers und der Funktionalität der Fahrerassistenz ist [Reif 2010], bzw. inwieweit die Auslegung der Fahrerassistenz auf die individuellen Fähigkeiten des Fahrers ausgerichtet ist [Beisel et.al. 2013]. Ist keine sinnvolle Abstimmung gegeben, kann die Verschiebung der Aufgaben und Aufmerksamkeiten des

Fahrers dazu führen, dass zwar eine Menge latenter Gefährdungssituationen reduziert wird, gleichzeitig aber neue Gefährdungssituationen geschaffen werden [Leveson 2011] [Schnieder u. Schnieder 2013]. Diesem Umstand hat sich ebenfalls die SAE gewidmet und strebt eine Vereinheitlichung der Systemübernahmezeiten durch den Fahrer in Abhängigkeit der Automatisierungslevel an – diese sind allerdings erst ab einem Level 3 vorgesehen [SAE J3016] [Vogelpohl 2016].

Es gibt die ersten tödlichen Verunglückten² durch Level 2 Systeme. Eine nähergehende Betrachtung des Tesla Model S Unfalls aus dem Jahr 2016 zeigt, dass die Kombination aus einer suboptimalen Schnittstellenauslegung und einer Fehlinterpretation der Umgebung durch die Automation einen tödlichen Unfall verursacht hat [Hosse et.al. 2017]. Weniger schwere Unfallereignisse treten auch bei nicht so stark assistierenden Systemen auf: So zeigt die Studie von [Lauterwasser 2016], dass das Unfallaufkommen von Verkehrsmitteln mit Rangiersensoren tatsächlich höher liegt als das Aufkommen von Park- und Rangierunfällen von Verkehrsmitteln ohne benannte Sensorik, vgl. Abbildung 2-2 [Lauterwasser 2016].

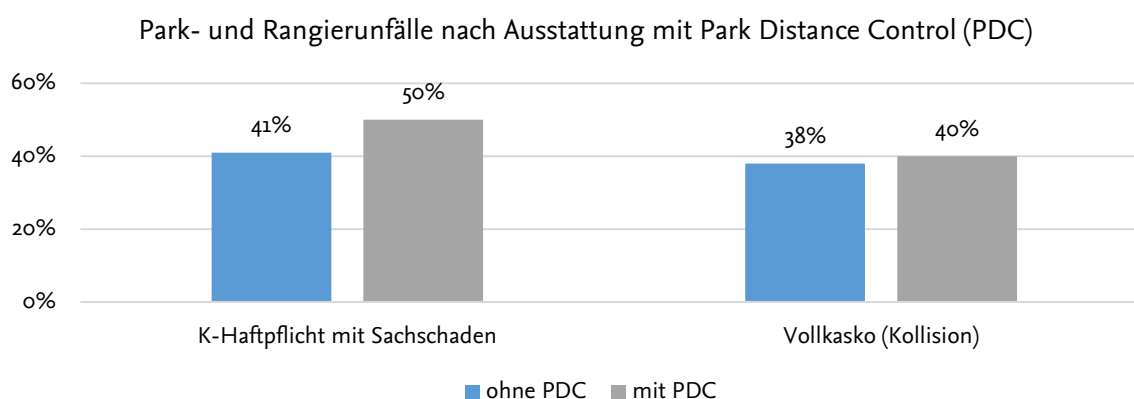


Abbildung 2-2: Park- und Rangierunfälle nach Ausstattung, nach [Lauterwasser 2016]

Andere negative Einflüsse auf die Verkehrssicherheit können durch technische Ressourcen verursacht werden, wenn diese in Verkehr gebracht werden, gleichzeitig aber noch keinen ausreichenden Serienreifegrad aufweisen. Jüngst hat die Studie von [Sitawarin et.al. 2018] gezeigt, dass die Verkehrsschildererkennung in 90% der Fälle zu Fehlinterpretationen führt, wenn vergleichbare, nicht-verkehrliche Schilder in ähnlicher Form und Höhe angebracht werden. So kann bspw. das Schild der Restaurantkette Kentucky Fried Chicken als ein Stopp-Schild von den Bilderkennungsalgorithmen interpretiert werden [Sitawarin et.al. 2018].

Es ist bzgl. des Einflusses von technischen Ressourcen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit in Verkehrsmitteln festzustellen, dass diese erst förderlich sind, „[...] wenn der Fahrer ihre Funktionsweise und ihre Grenzen im Großen und Ganzen versteht“ (nach [Färber 2006]). Sobald der intendierte Nutzen einer technischen Maßnahme im Verkehrsmittel nicht eindeutig der Steigerung des Komforts oder der Erhöhung der Sicherheit zugeordnet werden kann, entstehen hier prinzipiell Gefährdungsquellen. [Seppelt et.al. 2007] stellt z. B. eine Reihe von Missbrauchsszenarien eines Abstandsregelautomaten, auch ACC (Adaptive Cruise Control) genannt, dar. So nut-

² Der in 2018 erfolgte Uber-Unfall [New York Times 2018] ist im Rahmen der Fahrzeugerprobung entstanden und gilt als erster tödlicher Unfall eines hochautomatisierten Fahrzeugs.

zen einige Fahrer das System bei schlechten Sichtverhältnissen (u. a. Nebel), um hohe Geschwindigkeiten zu realisieren [Seppelt et.al. 2007]. Dieser missbräuchliche Einsatz ist zwar technisch möglich, gleichzeitig aber nicht vorgesehen.

Bereits [Bainbridge 1983] hat in seiner Arbeit „Ironies of Automation“ erkannt, dass mit zunehmender Automatisierung die Einbindung des Menschen in den operativen System-Prozess umso bedeutsamer ist. So formuliert er zwei Automatisierungs-Ironien:

1. Das Engineering sieht den menschlichen Akteur als unzuverlässig und ineffizient an, so dass dieser aus dem System eliminiert werden sollte und
2. Solange der Mensch nicht vollständig eliminiert werden kann, verbleibt dieser wiederum im System und übernimmt bis dato nicht automatisierbare Prozesse [Bainbridge 1983].

Auch Pfafferoth erwartete, dass „[...] je stärker sich Verbesserungen in leistungs- und erlebnisbetonte Fahrstile umsetzen lassen, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Nutzung von der ursprünglichen Sicherheitsabsicht entfernt“ [Haas et.al. 1991] und [Gründl 2005] stellt fest: „Bei der Beurteilung des Nutzens von Fahrerassistenzsystemen für eine Unfallprävention muss berücksichtigt werden, dass eventuelle Gewinne an Sicherheit möglicherweise wieder dadurch gemindert werden, dass Fahrer ihr Verhalten an die geänderten Fahrbedingungen anpassen und dadurch Risiken eingehen, die sie zuvor nicht eingegangen sind“ [Gründl 2005]. Technische Ressourcen in Verkehrsmitteln können also zu einer Steigerung der Verkehrssicherheit beitragen, wenn diese in der richtigen Art und Weise umgesetzt werden.

2.1.2 Verkehrsinfrastrukturseitige Einflussfaktoren

Aktuell tragen die technischen Ressourcen in der Verkehrsinfrastruktur primär zur Optimierung des Verkehrsflusses und damit indirekt zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei. Diese Optimierungspotentiale greifen primär in den infrastrukturellen Umgebungen der Autobahn und in innerstädtischen Bereichen. Außerstädtische Bereiche erfahren aktuell relativ wenig Aufmerksamkeit, was den Einsatz technischer Ressourcen angeht [Schnieder 2007]. Bisher werden hauptsächlich bauliche Maßnahmen in der Infrastruktur als sicherheitsförderlich betrachtet. Neuere Konzepte für die Infrastruktur stellen hier u. a. Shared Spaces dar: Das Konzept Shared Spaces sieht dabei bewusst die Auflösung einer steuernden, technischen Infrastruktur und die Auflösung dedizierter Verkehrswege in innerstädtischen Bereichen vor. Es wird erhofft, dass mittels Erhöhung der Selbstregulierung durch die Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, Kraftfahrzeugführer) die Sicherheit verbessert wird. Die bisher umgesetzten Testfelder für Shared Spaces haben bereits vor Einführung der neuartigen Infrastrukturgestaltung ein relativ geringes Unfallaufkommen gezeigt, so dass aufgrund der geringen Fallzahlen keine eindeutigen Aussagen zur objektiven Verkehrssicherheit abzuleiten sind [Gerlach et.al. 2007]. Die Studie von [Bode et.al. 2009] stellt sogar die Erwartungshaltung auf, dass es durch vermehrten Einsatz von Shared Spaces zu einer Erhöhung der Unfallzahlen bei gleichzeitiger Minderung der Unfallschweren kommt [Bode et.al. 2009].

Andere Ansätze, wie die sog. Fahrradstraßen, verfolgen das gegensätzliche Prinzip zu Shared Spaces und schaffen wiederum einen eigenen Verkehrsraum für Fahrräder mit entsprechender technischer Ausstattung zur Verkehrssteuerung und -regelung. Eine Studie der Unfallforscher der Versicherer (UDV) hat hier wiederum gezeigt, dass die Potentiale zur Verbesserung der Sicherheit in der Realität ebenfalls beschränkt sind [Schläger et.al. 2016]. Weder der verstärkte Einsatz von technischen Ressourcen, noch die De-Technisierung scheinen hohe Potentiale zur Stei-

gerung der Verkehrssicherheit zu haben. Entscheidender für die Infrastruktur ist der gute bauliche Zustand [Schnieder u. Schnieder 2013]. Das größte Potential für den Einsatz technischer Ressourcen in der Verkehrsinfrastruktur wird durch die Einführung sog. Car-to-Infrastructure (C2I) Kommunikation erwartet. [Brandenstein 2011] hebt hier allerdings hervor, dass „[...] der Austausch von Informationen zwischen Straße und Fahrzeug nur begrenzt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit beitragen kann [...]“ [Brandenstein 2011]. Technische Maßnahmen in der Infrastruktur zur Erhöhung der Verkehrssicherheit für eine hohe Zahl von Verkehrsteilnehmern erfordern einen massiven technischen und finanziellen Aufwand. Verbesserungen der Verkehrssicherheit werden nur räumlich auf beschränkte Anwendungsfälle sichtbar werden [Brandenstein 2011]. Aktuelle Normungsvorhaben bestreben eine Harmonisierung der Kommunikationsstandards, um so eine Grundlage für einen flächendeckenden Einsatz zu schaffen. Das Projekt [SAFESPOT 2009] hat bereits gezeigt, dass eine technische Umsetzbarkeit bereits möglich ist. Die Einführungszyklen benannter C2I-Technologien wird wiederum weitere Jahre bis Jahrzehnte erfordern und massive Harmonisierungsvorhaben, um kurzfristige Effekte in der Verkehrssicherheit zu generieren.

2.2 Menschliche Ressourcen als Gefährdungsquellen

Die Erhebungen der Unfallforschung und Verkehrspsychologie sehen nach wie vor den Menschen als primäre Gefährdungsquelle für Verkehrsunfälle [Krems u. Vollrath 2011]. Nach den ursprünglichen Erhebungen von [Schlag 2004] ist der Mensch auch heute noch an ca. 93% der Unfälle als Verursacher mitbeteiligt [Winner 2009], vgl. Abbildung 2-3.

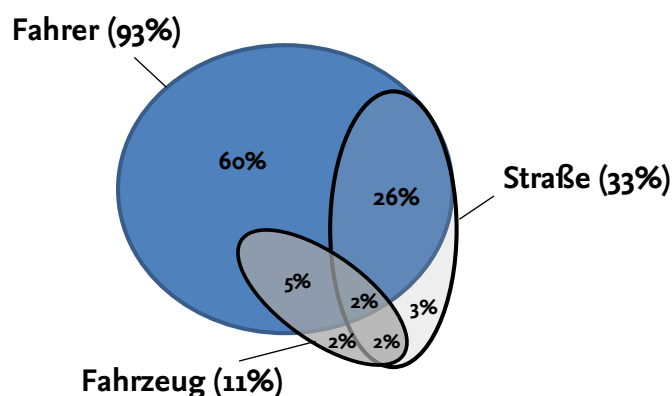


Abbildung 2-3: Unfallverursachungsanteile, in Anlehnung an [Schlag 2004] [Winner 2009]

Neben einer Betrachtung des individuellen Fahrers und einer Ursachenanalyse (vgl. Abschnitt 2.2.1), bedarf es weiterhin der Betrachtung, inwieweit gesellschaftliche und soziale Einflüsse (vgl. Abschnitt 2.2.2) sich als Gefährdungsquellen menschlicher Ressourcen eingrenzen lassen.

2.2.1 Individuell-menschliche Einflussfaktoren

Im System Fahrer-Fahrzeug-Fahrumwelt übernimmt der Fahrer als Ressource letztlich die Aufgabe eines Reglers für die Realisierung des Fahrprozesses, auch Fahrzeugführung genannt [Wiltshko 2003]. Die Aufgabe der Fahrzeugführung stellt an den Fahrer den Anspruch die Informationen, die er vom Fahrzeug und aus seiner Wahrnehmung der Umwelt erhält, in Reaktionen zu überführen. Der Fahrer nimmt eine kontinuierliche Informationsverarbeitung vor, die ihrerseits zur Anpassung seiner Reaktionen führt. Der Fahrer generiert aus den verfügbaren Infor-

mationen ein mentales Modell der Verkehrsumgebung und leitet basierend aus seiner individuell vorliegenden Regelbasis (definiert durch seine Fahrfähigkeiten) seine nächsten Handlungsschritte ab. Primär erhält der Fahrer dabei die benötigten Informationen zur Fahrzeugführung auf dem visuellen Weg [Abendroth/Bruder 2012] [Donges 2012].

Die individuellen Fahrfähigkeiten stellten sich als Einflussfaktor für die Verkehrssicherheit dar, sobald diese nicht mehr ausreichend sind, die verkehrlichen Aufgaben zu bewältigen und die sichere Fahrzeugführung zu gewährleisten. Ein verkehrspsychologisches Modell zur Beschreibung ebendieses Sachverhaltes ist das Fähigkeiten-Anforderungen-Schnittstellen-Modell von [Fuller u. Santos 2002]. Grundsätzlich ist das Fähigkeiten-Anforderungen-Schnittstellen-Modell von [Fuller u. Santos 2002] so aufgebaut, dass sich die Sicherheit im Straßenverkehr über den Grad der vorherrschenden Kontrollierbarkeit und die situativen Fahr-Anforderungen definiert, vgl. Abbildung 2-4.

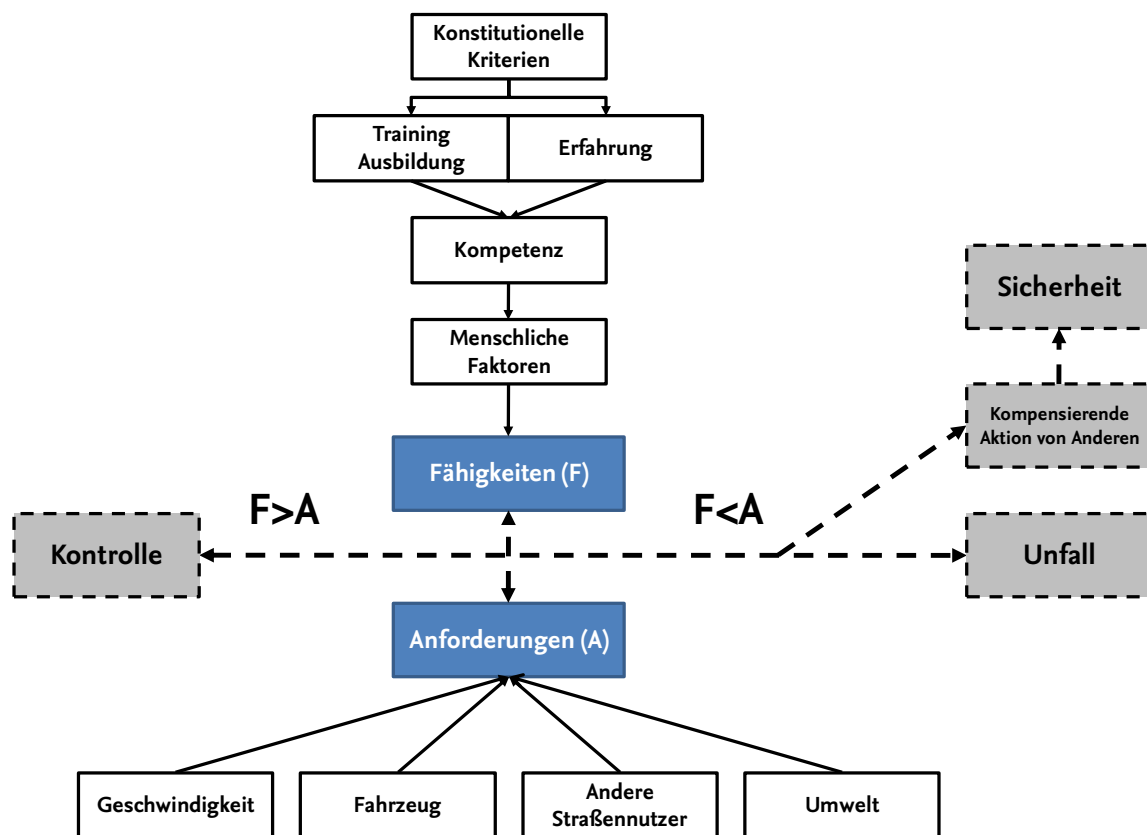


Abbildung 2-4: Fähigkeiten-Anforderungen-SchnittstellenModell nach [Fuller u. Santos 2002]

Dabei setzen sich die situativen Anforderungen aus der gefahrenen Geschwindigkeit, dem vorliegenden Fahrzeugtyp, den anderen Straßennutzern und der Umwelt zusammen. Die situativen Anforderungen stellen den Schweregrad der aktuellen Fahraufgabe dar, welche der Fahrer mit seinen individuellen Fähigkeiten bewältigen muss. Die fähigkeitsbildenden Faktoren stellen in dem Modell zuallererst die konstitutionellen Anforderungen dar. Auf Grundlage der Fahrausbildung, des praktischen Trainings und der vorliegenden Fahrerfahrung, ist der Fahrer in der Lage bestimmte Fahrfähigkeiten/-kompetenzen aufzubauen. In Kombination mit weiteren menschlichen Faktoren, wie z. B. dem kulturellen Hintergrund, wird die Summe der individuellen Fähigkeiten gebildet. Inwieweit eine Fahraufgabe als sicher oder unsicher einzustufen ist,

kann mittels Differenzbildung zwischen den Fahrfähigkeiten (F) und den Anforderungen (A) erfolgen [Fuller u. Santos 2002]. Es gelten hier folgende mathematische Zusammenhänge:

Eine Fahrsituation ist sicher, wenn gilt

$$(F, A) : \Leftrightarrow \forall F \cup A : F > A \quad (2.1)$$

Eine Fahrsituation ist unsicher, wenn gilt

$$(F, A) : \Leftrightarrow \forall F \cup A : F < A \quad (2.2)$$

Um nun Maßnahmen zu definieren, die den Fahrer als menschliche Ressource zur Verbesserung der Verkehrssicherheit vorsehen, kann entsprechend dem Modell von [Fuller u. Santos 2002] vorgegangen werden, um sukzessive die Fahrfähigkeiten zu verbessern, bzw. gleichzeitig die situativen Anforderungen und damit den Informationsverarbeitungsprozess zu verbessern:

Fahrerphysiologie und -psychologie

Zu den bildenden Einflüssen der Fahrfähigkeiten, neben der soeben erläuterten Kompetenzbildung durch die Fahrausbildung, kommen weiterhin sog. menschliche Faktoren hinzu: Hierzu zählen u. a. die individuellen Veranlagungen, Intelligenz, soziale Einflüsse, aber auch kulturelle Aspekte. In der Studie von [Svenson 1981] wurde insb. der Aspekt der Selbsteinschätzung der Fahrer hinsichtlich ihrer Fahrfähigkeiten untersucht: Die Studie zeigt, dass Fahrer dazu tendieren ihre eigenen Fahrfähigkeiten als besser einzuschätzen, als die anderen Fahrer. Demnach gibt es überdurchschnittlich viele sehr gute Fahrer und wenig Fahrer mit durchschnittlichen oder geringen Fähigkeiten. [Svenson 1981] stellt fest, dass Fahrer zu einer Selbstüberschätzung tendieren. Aktuellere Studien, z. B. der Unfallforschung der Versicherer [GDV 2011], zeigen, dass der von [Svenson 1981] aufgezeigte Sachverhalt, dass Fahrer sich grundlegend überschätzen, noch heute bestand hat.

Ein weiterer grundlegender menschlicher Faktor besteht in der Leistungsfähigkeit bei der Informationsverarbeitung. In den Arbeiten von [Miller 1956] konnte bereits gezeigt werden, dass der Mensch aufgrund seiner natürlichen Einschränkungen, hier der Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses, nur eine bestimmte Menge von sensorischen Signalen gleichzeitig verarbeiten kann. Hierunter wird heutzutage das Konzept der „*Chunks*“ verstanden. Nach [Miller 1956] können demzufolge nur sieben Eingangssignale gleichzeitig verarbeitet werden. So nutzt bspw. die Werbeindustrie zumeist nur Werbesprüche mit höchstens sieben Wörtern [Busch et.al. 2013], um so eine optimale Verarbeitung durch das Kurzzeitgedächtnis zu erreichen. Im Rahmen der steigenden Digitalisierung der Fahrzeuge zeigen bereits erste verkehrspsychologische Studien hier potentielle Gefährdungsquellen: Durch den verstärkten Einsatz von Informations- und Kommunikationssystemen in den Fahrzeugen tendieren Fahrer dazu sich schneller von der eigentlichen Fahraufgabe ablenken zu lassen [Vollrath et.al. 2015] [Martens 2011]. Weitere ablenkende Einflüsse in der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle wurden bereits von [Hewett et al. 1992] erarbeitet. [Hewett et al. 1992] stellt fest, dass unterschiedliche Bedienkonzepte die situativen Anforderungen an die Bewältigung der Fahraufgabe deutlich erhöhen.

Hinsichtlich der menschlichen Fahrfähigkeiten ist festzuhalten, dass es natürliche Grenzen der individuellen Leistungsfähigkeit der Fahrer gibt und dies zwangsläufig zu Unfällen führt. Vergleicht man die Ausbildungskonzepte der unterschiedlichen Verkehrsmoden (Luftfahrt, Schienenverkehr, Straßenverkehr), so zeigen sich einerseits die Verkehrsmoden der Luftfahrt

und des Schienenverkehrs als sicherer. Andererseits erfahren die Verkehrsmittelführer eine wesentlich bessere Kompetenzbildung, als es im Straßenverkehr der Fall ist. Dies zeigt sich ebenfalls in den Unfallzahlen der professionalisierten Fahrzeugführer im Straßenverkehr, wonach der ÖPNV als sicherstes Verkehrsmittel gewertet werden kann [Schnieder u. Schnieder 2013] [destatis 2016].

Fahrausbildung

Die Studien von [Helling 2011] konnten zeigen, dass bereits in der Fahrausbildung Defizite hinsichtlich der Bildung einer ausreichenden Fahrerfähigkeit zu finden sind. Dies wurde im Rahmen der empirischen Erhebung von [Beisel et.al. 2013] verdeutlicht, wo gezeigt werden konnte, dass die Bremsleistung von Fahranfängern nicht der erforderlichen Verzögerung in bestimmten Verkehrssituationen entspricht.

Einen anderen Aspekt, welcher bisher von der Fahrausbildung nicht abgedeckt wird, stellt die Schulung und der Umgang mit den am Markt erhältlichen Fahrerassistenzsystemen dar. Zur bestmöglichen Nutzung der Sicherheitsmerkmale von FAS sollten Fahrzeugführer stärker informiert und mit diesen Systemen vertraut gemacht werden. Oftmals scheint dabei den Fahrern nicht explizit bewusst zu sein, welche fahrphysikalischen und dynamischen Randbedingungen gelten und dass diese Grenzen nicht von der FAS verschoben werden können [Färber 2006] [Facijs 2010].

2.2.2 Kollektive Einflussfaktoren

Neben den individuell-menschlichen Einflussfaktoren gibt es ebenso eine Reihe von kollektiven Einflussfaktoren, welche sich aus dem gesellschaftlichen Einfluss ergeben. Im Folgenden wird auf drei dieser Arten der Einflussfaktoren eingegangen.

Social Learning

Eine weitere menschliche Gefährdungsquelle aus dem Bereich der Gesellschaft stellt das Social Learning dar: Das Konzept des Social Learning wird in der Fachliteratur kontrovers diskutiert. So werden z. B. klassische Lernmethoden als Social Learning definiert, ein für diese Betrachtung nichtzutreffende Eingrenzung. Das hier betrachtete Konzept des Social Learnings beruht auf der Arbeit von [Reed et.al. 2010] und stellt den Einfluss einer Gesellschaft auf die individuellen Verhaltensweisen dar. Nach [Reed et.al. 2010] basiert Social Learning auf zwei grundlegenden Konzepten:

1. Es muss eine Änderung der individuellen Ansichten eines am Social Learning Prozesses Beteiligten vorhanden sein.
2. Innerhalb einer gesellschaftlichen Gruppe müssen sich die gelernten Verhaltensweisen im sozialen Umfeld deutlich zeigen.

Demnach führt der Social Learning-Prozess dazu, dass die unterschiedlichen Individuen innerhalb einer sozialen Gruppe beginnen, ihre Ansichten und Meinungen über eine bestimmte Thematik zu teilen, z. B. die Legitimation von zu schnellem und riskantem Fahren. Dieser gesellschaftliche Effekt kann ebenso genutzt werden, um sicherheitsgerechte Verhaltensweisen innerhalb bestimmter sozialer Gruppen zu implementieren [Reed et.al. 2010]. Insbesondere in Zeiten der starken Nutzung von sozialen, meinungsbildenden Medien, wie YouTube®, üben Social Learning-Effekte durchaus einen Einfluss aus. Der in Abschnitt 1.1 erwähnte Tesla Model S-Un-

fall, findet nach der Erhebung von [Hosse et.al. 2017] auch eine Ursache in der aktiven Proklamation von Tesla-Fahrern zu einer verstärkt unaufmerksamen Fahrweise während der Aktivierung des Autopiloten.

Andererseits kann das Social Learning-Konzept auch gezielt zu der Bildung einer sicherheitsförderlichen Fahrweise genutzt werden. Dies wird z. B. durch den verstärkten Einsatz von Verkehrssicherheitskampagnen genutzt.

Demografischer Wandel

Der Aspekt des demografischen Wandels stammt aus der Mega Trend-Forschung. Der demografische Wandel beschreibt in diesem Kontext die sich verändernden Alters- und Berufsstrukturen der Bevölkerung. Die statistischen Erhebungen belegen, dass die Lebenserwartung kontinuierlich steigt und dadurch eine Erhöhung des Durchschnittsalters der Bevölkerung zu vernehmen ist: Die globale Lebenserwartung lag 1900 bei ca. 30 Jahren. Im Jahr 2000 war sie bereits auf 65 Jahre angestiegen [Watson u. Schneider 2014]. Das Durchschnittsalter der deutschen Bevölkerung ist seit 1950 um 5 Jahre gestiegen [Opaschowski 2004]. Dieser Wandel wird oftmals mit der Bevölkerungspyramide veranschaulicht, die voraussichtlich für das Jahr 2060 von vormals einer glockenförmigen Verteilung eher einem Baum gleichen wird [Grünheid u. Fiedler 2013]. Die Ursachen dieses Wandels werden mit den abnehmenden Geburtenraten und einer gestiegenen Lebenserwartung durch bessere medizinische Versorgung begründet [Sinn 2003].

Der demografische Wandel hat auch Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen. Statistisch gesehen verunglücken junge Fahrer im Alter zwischen 18 bis 24 Jahren häufiger im Straßenverkehr als ältere Fahrer. Obwohl der Anteil junger Fahrer gemessen an der Bevölkerung unter 10% liegt, ist diese Altersgruppe in ca. 25% der tödlichen Unfälle involviert [Brockmann 2015]. Demnach kann allein aufgrund des demografischen Wandels davon ausgegangen werden, dass das Sicherheitsniveau im Straßenverkehr automatisch verbessert wird: Langfristig sind anteilig weniger risikofreudige Fahrer vertreten.

Urbanisierung

Einen anderen gesellschaftlichen und damit menschlich relevanten Einflussfaktor auf die Verkehrssicherheit stellt die Urbanisierung dar: Die Urbanisierung (Gegenteil: Suburbanisierung) wird oft mit dem Begriff der Verstädterung gleichgesetzt. Hierunter versteht sich die Zunahme der Stadtbevölkerung im Verhältnis zur Landbevölkerung [Bähr 2011]. Die stetige Entwicklung von öffentlichen Nahverkehrsmitteln (Massenverkehrsmitteln) ermöglicht der Bevölkerung in größeren Distanzen zur Arbeitsstätte zu wohnen und führt damit zu einer Vergrößerung der städtischen Flächen [Blotevogel 2001]. Der Trend der Urbanisierung stellt einen globalen Effekt dar: In dem Zeitraum von 1975 bis 2012 ist die Anzahl der sog. Megacities – Städte mit mehr als zehn Millionen Einwohnern – von vormals drei auf 20 gestiegen [Watson/Schneider 2014]. Der in Städten lebende Bevölkerungsanteil ist analog gestiegen. Wohingegen 2009 noch 51 % der Bevölkerung in Städten lebten, wird erwartet, dass bis 2050 die Zahl auf 70% steigen wird. Städte leisten bereits heute 64 % des Verkehrsaufkommens, daher steht die Verstädterung vor der Herausforderung die steigenden Mobilitätsbedürfnisse zu befriedigen [Little 2009]. Die Urbanisierung wird langfristig zu Problemen führen, die das Leben der Menschen nachhaltig beeinflussen, z. B. Zunahme von Abfallprodukten oder ein Ressourcenmangel auf den hier nicht näher eingegangen werden soll [Bratzel 2014].

Das Bedürfnis an Mobilität wird weiter steigen, was zwangsläufig zu einer Zunahme von Umweltbelastungen, Verkehrsstauungen, Reisezeitverlängerung und Parkplatzmangel in städtischen Gebieten führt. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass die Zunahme innerstädtischer Verkehre zu einer Erhöhung der Verkehrsdichte und demnach zu einer geringeren Geschwindigkeit führt. Geringere und kontinuierliche Geschwindigkeiten zeigen tendenziell ein geringeres Unfallaufkommen und damit eine Steigerung der Verkehrssicherheit.

2.3 Institutionelle Ressourcen als Gefährdungsquelle

Als institutionelle Ressource mit einem Einfluss auf die Verkehrssicherheit lässt sich die Politik identifizieren. Wie bereits in der Einleitung in Kapitel 1 verdeutlicht wurde, konnten in der Vergangenheit mittels politisch geförderter Maßnahmen direkte Sprünge der Verkehrssicherheit generiert werden. Die Politik kann auch als *Innovator der Verkehrssicherheit* bezeichnet werden [Schnieder 2004] [Schnieder u. Schnieder 2013]. Die verkehrspolitischen Ziele innerhalb der Europäischen Union sind wie folgt festgelegt:

„Die für den Verkehr maßgeblichen Vertragsziele sind insbesondere der Binnenmarkt, die Gewährleistung eines hohen sozialen Schutzstandards, der Umweltschutz, die Verkehrssicherheit sowie der Auf- und Ausbau transeuropäischer Netze.“ [Wallnöfer 2009]

Innerhalb Deutschlands übernimmt das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) die leitende Funktion bei der Verkehrssicherheitsarbeit und legt den Fokus der politischen Tätigkeiten innerhalb des Straßenverkehrs fest. Das BMVBS setzt sich dabei fünf Prioritäten, an welchen sich die verkehrspolitischen Maßnahmen orientieren:

- *Verbesserung des Verkehrsklimas in Deutschland*
Ein Kennzeichen für das verschlechterte Verkehrsklima in Deutschland liegt laut dem BMVBS in der erhöhten Aggressivität der Straßenverkehrsteilnehmer. Dieses Verhalten der allgemeinen Rücksichtslosigkeit resultiert im Drängeln und Rasen. Als Gründe für diese unerwünschte Entwicklung wird die stetig zunehmende Verkehrsdichte angesehen, außerdem haben die bekannten Faktoren wie Zeit- und Termindruck einen Einfluss auf das Fahrverhalten.
- *Schutzmaßnahmen schwächerer Verkehrsteilnehmer*
Neben älteren Menschen und Kindern gehören ebenfalls schwach-geschützte Verkehrsteilnehmer, wie z. B. Fußgänger, Fahrradfahrer und motorisierte Zweiräder, zu den besonders gefährdeten Teilnehmern am Straßenverkehr. Somit haben die politischen Schutzmaßnahmen diese Gruppen im Fokus und ergreifen Infrastrukturverbesserungen sowie eine attraktivere Gestaltung von öffentlichen Verkehrsmitteln.
- *Reduzierung von Unfallursachen junger Fahrer*
Laut den Statistiken liegt der Anteil der 18- bis 24-Jährigen bei durchschnittlich 25% der Getöteten im Straßenverkehr. Demzufolge setzt sich das BMBVS zum Ziel das Risikoverhalten besagter Verkehrsteilnehmer zu mindern. Durch Anreizsysteme für die Teilnahme junger Fahrer an Verkehrssicherheitstrainings soll dieses Ziel erreicht werden.
- *Mindern des Gefahrenpotentials schwerer Nutzfahrzeuge*
Besonders schwere Nutzfahrzeuge beinhalten ein hohes Gefahrenpotential, daher unternimmt das BMVBS und die dazugehörigen Bundesämter Maßnahmen, um dieses zu mindern. Dazu gehören u. A. örtlich begrenzte Überholverbote, verbesserte Berufskraftfahrerausbildung und verstärkte Kontrollen.

- *Erhöhung der Verkehrssicherheit im Besonderen auf Landstraßen:*

Ein relevantes Augenmerk liegt auf den oftmals tödlichen Verkehrsunfällen auf Landstraßen. Die häufigsten Ursachen hierfür sind Geschwindigkeitsübertretungen sowie das Abkommen von der Fahrbahn und missglückte Überholvorgänge. Folglich werden Unternehmungen durchgeführt, welche besagte Unfallgründe verhindern sollen.

Die Verkehrspolitik nutzt zur Erreichung ihrer Ziele dabei die Instrumente der Gesetzgebung und die sogenannte „weiche“ Policy (siehe Abschnitt 2.3.1). Für die Verkehrspolitik sind im Besonderen der Terminus der „Policy“ und „Polity“ (siehe Abschnitt 2.3.2) von Bedeutung:

2.3.1 Einflussfaktor Policy

„Policy bezeichnet hier die Gesamtheit an Maßnahmen, die als Politikergebnisse der Europäischen Verkehrspolitik zu bezeichnen sind“ (nach [Dommel 2005]). Dazu gehören Maßnahmen in der Art von Richtlinien und Verordnungen, welche neben der konkreten Ausgestaltung der Fahrzeuge (u. A. die ECE-Regelungen zur Typgenehmigung) auch die operative Ausprägung des Straßenverkehrs (u. A. die Inhalte der Fahrschulausbildung) definieren. Hauptregelwerk für die Verkehrssicherheit stellt das Straßenverkehrs-Gesetz³ (StVG) dar und die daraus resultierenden Verordnungen der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) und der Straßenverkehrs-Verordnung (StVO):

- Die StVZO regelt mittels der europäischen Typzulassung, welche Art und Qualität die auf den Straßen zugelassenen Fahrzeuge aufweisen müssen. Durch die ECE-Regelungen kann der Gesetzgeber ein Mindestmaß an sicherheitsrelevanten Anforderungen stellen.
- Die StVO regelt hingegen, nach welchen Vorgaben der eigentliche Straßenverkehr durchzuführen ist, hierunter fallen die sog. Verkehrsregeln. Diese sind integraler Bestandteil der Fahrschulausbildung und bilden daher die Grundregeln der Fahrzeugführung für die Fahrer.

2.3.2 Einflussfaktor Polity

Im Gegensatz dazu beinhaltet die „Polity“ den Ordnungsrahmen, innerhalb dessen die Verkehrspolitik stattfindet [Dommel 2005]. Dabei stellt Polity die politische Dimension der Institutionen dar, welche die Policy umsetzen. So hat der Gesetzgeber mit Hilfe der Institution der ausführenden Exekutive die Möglichkeit Verkehrssünder zu ahnden und zu überwachen. Andere Polity-Maßnahmen beinhalten es z. B. steuerliche Vor- bzw. Nachteile für bestimmte Fahrzeugtypen zu schaffen und damit indirekt einen Einfluss auf die sich im Verkehr befindlichen Fahrzeuge auszuüben.

2.4 Marktwirtschaftliche Ressourcen als Gefährdungsquelle

Die marktwirtschaftliche Bedeutung der sicheren Mobilität im Straßenverkehr stellt eine Voraussetzung für das wirtschaftliche Wachstum einer räumlich differenzierten Marktwirtschaft dar [Link 2011]. Der marktwirtschaftliche Einfluss auf die Verkehrssicherheit stellt daher auch ein Eigeninteresse dar. Wie bereits in 1.2 erläutert, ist die Verkehrssicherheit im Rahmen der

³ Gesetze und Verordnungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht im Literaturverzeichnis aufgenommen. Es wird sich an der juristischen Lesart orientiert, welche vorsieht, dass ein/e Gesetz/Verordnung in seiner gültigen Fassung entsprechend der Veröffentlichung dieser Arbeit in Kontext gesetzt wird.

Entscheidungsfindung der Hersteller ein relevanter Parameter der Produktgestaltung. Im Rahmen dieser problemorientierten Darstellung soll folgend auf marktwirtschaftliche Trends eingegangen werden, die einen Einfluss auf die Verkehrssicherheit ausüben. Es wird im Folgenden daher auf den Einfluss der Fahrzeughersteller eingegangen, siehe Abschnitt 2.4.1, und den Einfluss der Versicherungswirtschaft, siehe Abschnitt 2.4.2.

2.4.1 Herstellerseitige Einflussfaktoren

Fahrzeugdigitalisierung

Insgesamt zeigt sich ein technologischer Wandel des Automobils, diese Entwicklung wird subsummiert unter dem Begriff der Digitalisierung des Automobils. Neben der zunehmenden Integration von softwarebasierten Komponenten nimmt äquivalent die Anzahl an Codezeilen im Fahrzeug exponentiell zu. So weist ein Mittelklassefahrzeug mittlerweile mehr Codezeilen auf als ein Airbus® A380 [Schüffele 2010]. Die Integration von Smartphones und die Öffnung des Systems Fahrzeug zu seiner Umgebung bedingen einen massiven Anstieg von Funktionen. Dies bildet sich auch durch die zunehmende Anzahl von Funktionsverantwortlichen bei den Automobilherstellern ab. Das Fahrzeug wird verstärkt als Service-Plattform verstanden und dient immer weniger seiner ursprünglichen Funktion, dem Transport in erster Linie.

Gleichzeitig verkürzen sich die Produktlebenszyklen, was wiederum die Hersteller dazu treibt die Entwicklungszyklen zu verkürzen [Kuder 2005]. Die Verkürzung von Produktlebenszyklen beinhaltet immer das Potential für ein vermehrtes Auftreten von Entwicklungsfehlern. Hersteller, wie Tesla, sehen deshalb bereits sog. Software-Aktualisierungen over-the-air (OTA) vor: Der Nutzer kann ohne in die Vertragswerkstatt zu gehen den neuesten Softwarestand auf dem Fahrzeug installieren. Der Effekt der sog. „Zehnerregel“ für das Verhältnis zwischen Auftreten des Fehlers im Produktlebenszyklus und seinen Fehlerbehebungskosten postuliert, dass je früher ein Produktfehler identifiziert wird, desto geringer sind die Kosten für die Fehlerbehebung [Pfeifer 2001].

Fahrzeugautomatisierung

Das hochautomatisierte Fahren stellt mittlerweile das gemeinschaftliche Ziel der Automobilindustrie dar. Nachdem bisher marktfremde Akteure, wie Google, den Automobilmarkt betreten und mittlerweile führende Positionen im Bereich der Fahrzeugautomatisierung erlangt haben, bestreben nunmehr alle traditionellen Fahrzeughersteller hochautomatisierte Fahrzeuge in Serie zu bringen. Allerdings stellt für höher automatisierte Fahrzeuge die Verkehrssicherheit eine wesentliche Voraussetzung für die Einführung und Akzeptanz dar [Fujita u. Hollnagel 2004] [Maurer et.al. 2015].

Neben der rein technischen Herausforderung ein sicheres hochautomatisiertes Fahrzeug zu entwickeln, gibt es zulassungstechnische Hürden, die erst vor der Einführung von hochautomatisierten Fahrzeugen genommen werden müssen. Zwar schafft der deutsche Rechtsrahmen durch die Novellierung des Straßenverkehrsgesetzes die Grundlagen zur Einführung hochautomatisierter Systeme, allerdings besteht noch keine ausreichende Erfahrung, um ein Homologationsverfahren auf Basis der ECE-Regelungen zu implementieren. Zumindest ist der Gesetzgeber durch die Einberufung einer Ethik-Kommission dahingehend einig, dass die Sicherheit hochautomatisierter Systeme mindestens gleichwertig der menschlichen Leistungsfähigkeit im Straßenverkehr sein muss. Die soll mittels Aufstellung einer sog. Risikobilanzierung erfolgen [Ethik-Kommission 2017]. Wie die praktische Umsetzung dieser Risikobilanzierung erfolgt,

wurde vom Gesetzgeber bisher nicht vorgegeben. Es sind Ansätze denkbar, die sich an Industriesektoren orientieren, die bereits Erfahrung mit der Zulassung von Produkten mit inhärenten Restrisiken aufweisen. Die Arzneimittelzulassung verfolgt dabei einen strukturierten Ansatz, bei dem mittels vom Gesetzgeber vordefinierten Risikobilanzierungsverfahren der Nutzen einer neuen Arznei gegenüber dem verbleibenden Restrisiko evaluiert wird [ProAct-URL 2018] [Schnieder u. Hosse 2018].

Normung

Ein weiterer marktwirtschaftlicher Einfluss ist durchaus in der Normung zu sehen. Die Hersteller nutzen die aktive Gremienarbeit in den nationalen und internationalen Normungsgremien als Chance ihre Erfahrungen und Best-Practice zum Stand der Technik zu erheben. Aktuell werden sicherheitsrelevante Systeme in Kraftfahrzeugen nach dem internationalen Standard der [ISO26262] entwickelt. Dieser seit 2011 im Nachgang zum Airbag Urteil des Bundesgerichtshofs [BGH 2009] herangezogene Standard wird im Rahmen der Produkthaftungsprophylaxe zur Entwicklung betreffender System herangezogen. Im Rahmen der Digitalisierung und Hochautomation muss wiederum festgestellt werden, dass die Aspekte der Funktionalen Sicherheit, nach [ISO26262] zu verstehen als der eigentliche Funktionsausfall, nicht mehr ausreichend sind, um sichere Produkte zu entwickeln. Aspekte wie die Gebrauchssicherheit, welche aktuell eine Normung durch SOTIF (safety of the intended functionality) [ISO/WD PAS 21448] erfahren, betrachten neben dem Funktionsausfall, inwieweit ein System auch bei vollständiger Einhaltung seiner Anforderungen und Funktionalitäten in einen unsicheren Zustand divergieren kann. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt bereits [Leveson 2004] mit ihrem STAMP Ansatz seit 2001.

Ein dritter sicherheitsrelevanter Aspekt stellt der Schutz der Fahrzeuge vor intendierten Angriffen von außen dar – der sog. Security. Hier gibt es ebenfalls aktuell Normungsvorhaben, die eine branchenweite Harmonisierung der Vorgehensweise vorsehen [ISO/SAE AWI 21434]. Da es bisher zu keinen menschlichen Verlusten durch intendierte Angriffe gekommen ist, wird hier nicht weiter auf diesen Einfluss eingegangen.

2.4.2 Versicherungswirtschaftliche Einflussfaktoren

Ein weiterer relevanter Einfluss auf die Verkehrssicherheit wird seitens der Versicherungswirtschaft ausgeübt. Durch die Haftpflichtversicherung befinden sich alle Verkehrsteilnehmer in einer Art monetärem Ahndungssystem, welches sich in Form der monatlichen Versicherungsbeiträge angepasst an das individuelle Erfahrungslevel und Unfallaufkommen orientiert: Je mehr Unfälle ein Fahrer, bzw. ein Kollektiv verursacht, desto höher wird der Beitrag; umgekehrt sinken diese bei ausbleibenden Schäden und steigender Fahrerfahrung.

Die Unfallversicherungsträger sind gemeinschaftlich organisiert mit dem Ziel der Minderung von Verkehrsunfällen. Ein weiteres Tätigkeitsfeld der Versicherungswirtschaft besteht in einer aktiven Forschung über Verkehrssicherheit sowie Lobbyarbeit und damit der aktiven Beeinflussung der gesetzgebenden Institutionen. Somit wirkt die Versicherungswirtschaft ebenfalls bewusst auf den politischen Prozess ein, mit dem Ziel die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Somit wird versucht mit einer möglichst umfassenden Verkehrsforschung die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen [GDV 2016] [DGUV 2011].

Neben den Forschungsaktivitäten und der Lobbyarbeit gibt es wiederum neuartige Versicherungsmodelle, die einen kurzfristigeren Einfluss auf die Verkehrssicherheit ausüben: Die pay-as-you-drive (PAYD)-Versicherungen basieren auf einer direkten Erhebung des Fahrverhaltens

des Fahrers im Fahrzeug. Nimmt der Fahrer grundlegend einen sicherheitsförderlichen Fahrstil ein, passt sich unmittelbar der Versicherungsbetrag an das risikoaverse Fahrverhalten an. Wird detektiert, dass der Fahrer zu einer risikofreudigen Fahrweise tendiert, gekennzeichnet u. a. durch schnelle Beschleunigungen oder Verzögerungen, erhöht sich parallel der Versicherungsbetrag. Die Fahrer erhalten dadurch die Möglichkeit eine objektivere Bewertung ihres individuellen Fahrverhaltens zu bekommen und ihr Fahrverhalten kurzfristig anzupassen. Zwar bestehen diverse datenschutzrechtliche Bedenken von PAYD-Versicherungen, die aktuellen Felderfahrungen zeigen jedoch ein deutlich geringeres Unfallaufkommen der PAYD-Nutzer [Bordoff u. Noel 2008] [Bolderdijk et. al. 2011].

2.5 Schlussfolgerungen

Wie bereits in der Problemstellung der Arbeit (siehe Abschnitt 1.3) kurz dargelegt, gibt es einerseits primär für den Bereich der technischen Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit quantifizierte Verfahren der Prognose der Verkehrssicherheit. Gleichzeitig zeigt die soeben durchgeführte Betrachtung, dass die verschiedenen Ressourcen einen positiven Effekt auf die Verkehrssicherheit ausüben können, diese allerdings nicht immer mit der notwendigen Stringenz umgesetzt werden. Insbesondere das Feld der menschlichen Ressourcen ist bisher wenig im Rahmen einer Wirkung auf das Gesamtsystemverhalten betrachtet worden, obwohl durchaus Konzepte zur Verbesserung der menschlichen Leistungsfähigkeit bekannt sind (vgl. Abschnitt 2.2.1). Andere Konzepte aus der Versicherungswirtschaft, wie PAYD, zeigen in den bisher durchgeführten Studien sehr gute Ergebnisse, so dass von einer signifikanten Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit bei erhöhter Einführung ausgegangen werden kann. Ein weiteres Beispiel besteht in dem doch signifikanten Einfluss der politischen Institutionen. Gesetzliche Maßnahmen wirken meistens unmittelbar im Verkehrssystem und können zu einer deutlichen Verbesserung der Verkehrssicherheit führen.

Es bedarf daher eines einheitlichen und ganzheitlichen Ansatzes, welcher in der Lage ist die vorhandenen Maßnahmen normiert miteinander zu vergleichen. D. h. unabhängig davon, ob eine Ressource direkt am Verkehrsmittel, am Verkehrsobjekt, der Verkehrsinfrastruktur oder der Verkehrsorganisation wirkt, sollte eine Bewertung der möglichen Verbesserung der Sicherheit über die konstituentenspezifische Sicht hinaus bereitgestellt werden können.

3 Methodischer Ansatz

*“Die wertvollsten Einsichten
werden am spätesten gefunden,
aber die wertvollsten Einsichten
sind die Methoden.”*

(Friedrich Wilhelm Nietzsche)

Aufgrund der formulierten Zielsetzung in Abschnitt 1.4 sind für eine Prognose der Straßenverkehrssicherheit geeignete Ansätze zu identifizieren. Der neuartige Ansatz dieser Dissertation besteht darin, aus der Fülle bisheriger Ansätze (Verfahren und Modellkonzepte) die Schwächen zu identifizieren, einen neuen Ansatz zu finden und diesen exemplarisch anzuwenden. Der zugrunde gelegte methodische Ansatz dieser ist entsprechend einer klassischen V-Modell-Entwicklung (vgl. hier u. a. [ISO 26262]) ausgelegt. Hierbei werden auf Basis einer Zielsetzung die erforderlichen Anforderungen erhoben, diese konzeptionell ausdifferenziert, konkret implementiert und schließlich verifiziert und validiert. Der methodische Ansatz sieht acht Einzelschritte vor, in denen die Zielsetzung erarbeitet wird. Diese werden im Folgenden beschrieben:

1. *Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit*
Um den genauen Umfang der Zielsetzung bei der Entwicklung einer Wirkfeld-Prognose einzugrenzen, ist eine ausführliche Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit durchzuführen. Nur so kann eine Auswahl der relevanten Maßnahmen auf die Verkehrssicherheit seitens der Verkehrsmittel, Verkehrsobjekte, Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsorganisation vorgenommen werden. Dies ist bereits in Kapitel 1 erfolgt.
2. *Erhebung verfügbarer Verkehrssicherheitsprognoseverfahren*
Nachdem die Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit bestimmt sind, kann eine Betrachtung der verfügbaren Beschreibungsmittel, Methoden und Verfahren zur Verkehrssicherheitsprognose durchgeführt werden. Hierbei ist eine grundlegende Terminologie zu Prognosen zu definieren, wie auch die grundlegende Problematik bei der Bestimmung von Prognosewerten darzustellen. Es sind die im Stand der Forschung genutzten Beschreibungsmittel und Modelle zu erarbeiten und gegenüber der Zielsetzung dieser Arbeit zu bewerten. Als besonders bedeutsam wird hier die Identifikation verschiedener Prognoseverfahren angesehen. Diese können einerseits auf datenbasierten oder modellbasierten Verfahren basieren. Weiterhin ist das Feld der simulativen Verkehrssicherheitsprognose zu betrachten (sog. Wirkungsanalysen). Es findet eine Bewertung der identifizierten Prognoseverfahren gegenüber der Zielsetzung der Arbeit statt.
3. *Erhebung relevanter Modellkonzepte zur Verkehrssicherheit*
Neben der Erhebung und Bewertung der Prognoseverfahren ist gleichfalls von Bedeutung, welches Modellkonzept dieser Arbeit zugrunde gelegt wird. Das Modellkonzept wird entscheidend über die Leistungsfähigkeit und Plausibilität der Wirkfeld-Prognose entscheiden. Daher sind Modellkonzepte verschiedener Fachdisziplinen zu betrachten.

Dies ist insbesondere im Hinblick auf die zahlreichen Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit von Bedeutung. Es wird ein für diese Arbeit geeignetes Modellkonzept definiert.

4. *Anforderungserhebung an die Wirkfeld-Prognose*

Nachdem die Schwächen und Stärken der Verfahren und Modellkonzepte bekannt sind, können Anforderungen an das zu entwickelnde Prognoseverfahren und damit die Wirkfeld-Prognose gestellt werden. Die Anforderungsspezifikation dient als Basis für die Formulierung der zugrundeliegenden Modellstruktur [Sterman 2004]. Neben der Eingrenzung hinsichtlich problematischen, gewünschten und/oder beobachtbaren Modellverhaltens [Richardson 2011] [Ford 1999] ist weiterhin der avisierte Zeithorizont der Prognose festzulegen [Sterman 2004].

5. *Methodenqualifizierung*

Nachdem die bisherigen Schritte des methodischen Ansatzes eher spezifizierender Art sind, wird nun eine prä-Validierung vorgesehen – hier die Methodenqualifizierung. Im Rahmen dieser Arbeit ist es der Anspruch die Wahl des anzuwendenden Prognoseverfahrens nicht ausschließlich auf Basis der Erhebung des Stands der Forschung vorzunehmen, sondern eine vereinfachte exemplarische Anwendung der potentiellen Beschreibungsmittel, Methoden und Verfahren vorzunehmen. Die Ergebnisse der Anwendung werden gegen die Anforderungen validiert. Somit kann bestimmt werden, welche Prognoseverfahren am besten geeignet sind für die Realisierung der Wirkfeld-Prognose.

6. *Modellformulierung und Entwicklung*

Auf Basis der Erkenntnisse der Methodenqualifizierung wird das grundlegende Konzept der Wirkfeld-Prognose (vgl. Abschnitt 1.5) modelltheoretisch vollständig ausformuliert. Die Kombination aus dem Sicherheitspotential und dem Prognosemodell stellt das in dieser Arbeit erarbeitete Prognoseverfahren dar. Es wird die Festlegung einer grundlegenden Modellarchitektur (Modellstruktur), seiner Zielsetzung (Festlegung von Systemgrenzen) und grundlegenden Funktionalität (dynamische Hypothese) erarbeitet.

7. *Exemplarische Anwendung der Wirkfeld-Prognose*

In diesem Schritt des methodischen Ansatzes wird das Prognosemodell exemplarisch angewendet, einer Analyse und validierenden Tests unterzogen. Die Realisierung der Analyse und Tests erfolgt im Rahmen einer geeigneten Tool-Kette abhängig vom gewählten Prognoseverfahren. Es ist durch die exemplarische Anwendung des Prognosemodells zu zeigen, inwieweit sich das Prognosemodell realitätstreu und damit plausibel verhält [Sterman 2004]. Da allein durch die Verwendung eines Modells zur Prognose der Verkehrssicherheit praktisch die Richtigkeit des Modells nicht bewiesen werden kann [Sterman 2004], ist in diesem Modellentwicklungsschritt zu zeigen, dass eine ausreichende Plausibilität und Realitätsnähe vorhanden ist [Forrester u. Senge 1980].

8. *Identifizierung der Implikationen für Entscheidungsträger*

Auf Basis der exemplarischen Anwendung der Wirkfeld-Prognose werden Implikationen der prognostizierten Entwicklung der Verkehrssicherheit unter Einfluss ausgewählter Verkehrssicherheitsmaßnahmen getroffen.

9. *Kritische Würdigung und weiterer Forschungsbedarf*

Im Rahmen der sich grundsätzlich anschließenden kritischen Würdigung werden die erkannten Schwächen des entwickelten Prognoseverfahrens identifiziert und diskutiert. Der methodische Ansatz ist in folgender Abbildung 3-1 dargestellt.

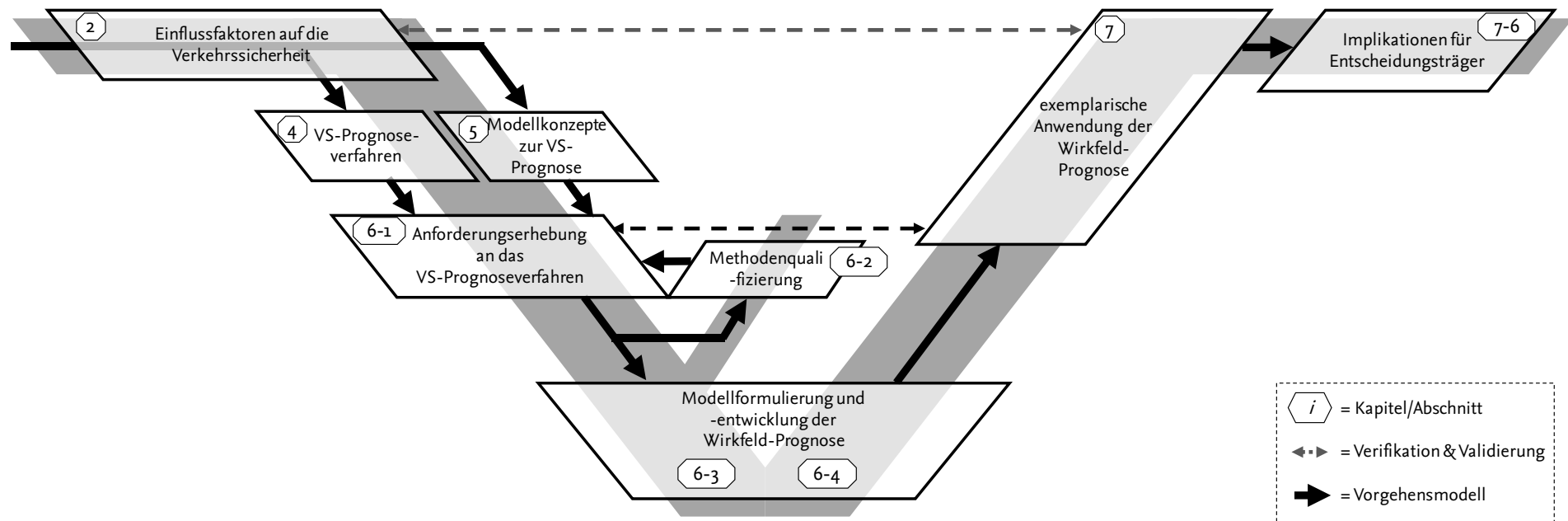


Abbildung 3-1: Modellentwicklungsprozess, in Anlehnung an v-Model und [Sterman 2004]

4 Prognoseverfahren zur Verkehrssicherheit

“Prognosen sind schwierig, besonders, wenn sie die Zukunft betreffen.”

(u.a. Winston Churchill)

Um eine modellbasierte Prognose der Straßenverkehrssicherheit durchzuführen, stellt sich in erster Linie die Frage, welche existierenden Modelle und Prognoseverfahren der Stand der Forschung bereits erarbeitet hat, welche prinzipiell genutzt werden können. Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass bisher der Stand der Forschung nicht explizit eine Differenzierung zwischen Modellkonzepten und -arten von Prognoseverfahren und Wirkungsanalysen vornimmt, vgl. hierzu [Hughes et.al. 2015]. Um hier eine Strukturierung zu schaffen, wird dieses Kapitel zuerst die grundlegende Fragestellung von Prognosen darlegen (siehe Abschnitt 4.1) und daraufhin auf Modellarten für die Prognose der Verkehrssicherheit eingehen (siehe Abschnitt 4.2). Nachdem die Modellarten vorgestellt sind, wird auf datenbasierte Prognoseverfahren (siehe Abschnitt 4.3) und modellbasierte Prognoseverfahren (siehe Abschnitt 4.4) näher eingegangen. Der Themenbereich der Wirkungsanalysen wird im Anschluss daran betrachtet (siehe Abschnitt 4.5). Dieses Kapitel endet mit einer Reihe von Schlussfolgerungen und nimmt eine Eingrenzung geeigneter Modellarten und Prognoseverfahren vor (siehe Abschnitt 4.6).

4.1 Grundlegende Fragestellung von Prognosen

Die grundlegende Fragestellung von Prognosen ist ausführlich im Bereich der Technikphilosophie erarbeitet. Die Technikphilosophie befasst sich seit den Anfängen der sog. Technikfolgenabschätzung in den 1960er Jahren mit der Prognoseproblematik: Das Verhalten von komplexen Systemen lässt sich nicht auf lineare Zusammenhänge und Kausalitäten beschränken, sondern bedingt eine Vielzahl von Interdependenzen, die einen Einfluss auf das Systemverhalten ausüben, und auch auf Nebeneffekte. Neben der praktischen Durchführung einer Prognose für ein interessierendes komplexes System sind folglich auch techno-philosophische Betrachtungen zur Erörterung der Problemstellung relevant: Die techno-philosophische Diskussion zum Thema ‚Prognose‘ ist bisher nicht definitiv entschieden. Einig ist sich die Technikphilosophie dahingehend, dass jede Art der Prognose zwei Merkmale aufweist:

1. alle getroffenen Prognoseaussagen müssen Erwartungsaussagen sein und
2. die in den Aussagen getroffene Erwartungspräferenz muss begründet sein.

Es kann grundlegend zwischen zwei Arten der Prognose, hier *Prognosen im engeren Sinne* und *Prognosen im weiteren Sinne*, unterschieden werden. Diese Differenzierung in den Prognosearten wird in den folgenden beiden Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 näher erläutert.

4.1.1 Prognosen im engeren Sinne

Unter *Prognosen im engeren Sinne* wird gemäß [Popper 1935] und [Hempel u. Oppenheim 1948] eine prognostische Aussage über ein System auf Basis von bekannten logischen Gesetzmäßigkeiten und Randbedingungen verstanden. Infolge der von [Knapp 1978] etablierten Terminologie können *Prognosen im engeren Sinne* auch als *erklärende Prognosen* bezeichnet werden. Dieser Prognosetyp lässt sich wiederum nur auf eine eingeschränkte Menge von Systemen anwenden. Voraussetzung für die Anwendung erklärender Prognosen ist das Vorhandensein streng spezifischem Gesetzeswissen über das System. Dieses Wissen muss nicht zwingend aus dem System selbst generiert werden, sondern kann auch im Rahmen andersartigen Wissens aufgebaut werden. Voraussetzung für die Validität der Prognoseaussagen ist die Validität der Gesetzmäßigkeiten [Zimmerli 1982].

4.1.2 Prognosen im weiteren Sinne

Prognosen im weiteren Sinne verfolgen im Vergleich zu *Prognosen im engeren Sinne* die gleiche Zielsetzung, können aber nicht auf eine explizite Ursachenbestimmung zurückgreifen. Daher stellt die Validität der Gesetzmäßigkeiten keine Validierung der Prognose bereit, sondern es muss vielmehr die Begründung der Erwartungspräferenzen betrachtet werden. In den Bereichen der politischen, wirtschaftlichen und technologischen Planung werden verschiedenste Begründungstechniken zur Prognosevalidierung angewendet und ausdifferenziert. Typologisch lassen sich diese auf zwei Grundformen reduzieren:

1. *Trendprognosen*: Dieser Prognosetyp greift auf die Methoden der Trendanalysen zurück und führt eine Trendextrapolation durch. Diese erfolgt auf Basis einer gegebenen endlichen Datenmenge. Prinzipiell ist es daher möglich eine beliebige Zahl von Trendkurven durch diese Datenmenge zu legen. Aus den Kurvenverläufen (steigend, fallend, oszillierend) definiert sich die Erwartungsaussage. Demzufolge bedarf es einer qualifizierten Begründung der Präferenz der gewählten Kurvenverläufe im Gegensatz zu anderen möglichen Extrapolationsergebnissen.
2. *Delphi-Prognosen*: Dieser Prognosetyp ermittelt Erwartungsaussagen mittels Expertenbefragung(en) (Orakelcharakter). Ebenso ist hier eine Begründung der Präferenzen notwendig. Konkret muss dahingehend differenziert werden, wer die befragten Experten sind und wie ihre Aussagen begründet sind. Weiterhin ist der Prozentsatz der Experten-Übereinstimmung von Bedeutung, um die Prognoseaussagen zu qualifizieren [Helmer u. Rescher 1959].

4.1.3 Prognoseproblematik

Für *Prognosen im engeren* und *im weiteren Sinne* ergibt sich jeweils eine zugrundeliegende Prognoseproblematik, welche auch als Prognoseproblem bezeichnet wird:

- *Prognosen im engeren Sinne* lassen sich allenfalls für Technikfolgenabschätzungen anwenden, wenn einerseits valide Gesetzmäßigkeiten bekannt sind und andererseits keine Nebeneffekte zu erwarten sind. Nebeneffekte sind hier als Effekte zu verstehen, welche einen Einfluss auf das zukünftige Verhalten des Systems ausüben, gleichzeitig aber nicht kausal erfassbar sind. Sollten Nebeneffekte auftauchen, dann ist davon auszugehen, dass diese auf Basis von Wertannahmen erfolgen, die wiederum nur mittels Delphi-Prognosen erhoben werden können. Es findet folglich eine Vermischung zwischen Prognosen im engeren und weiteren Sinne statt. Die Bewertung zwischen den Interdependenzen von prognostischen

Nebeneffekten und prognostizierten Erwartungsaussagen lässt sich höchstens deskriptiv festhalten. Oftmals wird diese Bewertung mittels irrationaler Verfahren durchgeführt und ist nicht mehr in der Lage alternative Prognoseaussagen zu argumentieren (vgl. [Meyer-Abich 1979] u. [Meyer-Abich 1981]).

- Für *Prognosen im weiteren Sinne* liegt das Problem der sog. Zirkularität impliziter Definitionen zugrunde: Die Begründung der Erwartungspräferenzen kann bereits die Erwartungswerte der Prognose definieren. Die Prognose ist somit nur bedingt in der Lage valide Erwartungsaussagen zu treffen [Paschen et.al. 1978]. Die Begründung der Erwartungspräferenzen erfolgt dann zumeist auf einer Kette von szenariodependenten Wenn-Dann-Prognosen.

Es fehlt hier eine faktische und funktionale Basis für normative Modelle des Gesamtverlaufs von komplexen Systemen, die eine Plausibilisierung von begründbaren und unbegründbaren Erwartungsaussagen ermöglicht. Um nun eine plausible Prognose der Verkehrssicherheit vorzunehmen, ist eine begründete Auswahl geeigneter Modellarten und Verfahren notwendig. Im Folgenden wird nun auf die verfügbaren Modellarten für die Prognose der Verkehrssicherheit eingegangen.

4.2 Prognosemodelle

Die mathematische Grundlage für Prognosen wurde bereits von Newton beschrieben: Newton postulierte dabei, dass soweit jeder Zustand eines Systems (bis hin zur atomaren Ebene) zu jeder Zeit bekannt ist, man dessen künftiges Verhalten aufgrund des vorliegenden Determinismus bestimmen kann. Je vollständiger die Information über das System und damit das Prognosemodell ist, desto genauer und präziser wird folglich die Vorhersage [Dekker et.al. 2011]. Ein Modell, zu verstehen als Abbild der Realität [Bossel 2004], kann als prognosefähig bezeichnet werden, wenn es die Antwort eines Systems mit hinreichender Genauigkeit vorhersagt. Die Herausforderung des Prognosemodells besteht in der Untestbarkeit des Realsystems. Dies trifft insbesondere auf das Straßenverkehrssystem aufgrund seiner Größe und Komplexität zu. Das Verkehrssystem ist in seiner Gesamtheit nicht real testbar. Die Eigenschaft Sicherheit lässt sich folglich auf Basis von Modellen testen, bzw. analysieren. Diese Modellierung beinhaltet nicht automatisch eine Prognosefähigkeit. [Hughes et.al. 2015] klassifiziert hierzu sieben grundlegende Modellarten für Verkehrssicherheitsmodelle (vgl. Tabelle 4-3):

Inwieweit eine der benannten Modellarten zur Prognose der Verkehrssicherheit im Sinne dieser Arbeit geeignet ist, unterliegt zwei Charakteristiken: *Auflösungsgrad* des Verkehrssicherheitsmodells und *Prognosefähigkeit* des Verkehrssicherheitsmodells.

- Der *Auflösungsgrad* bestimmt, ob die Modellart für die avisierte makroskopische Betrachtung des Verkehrssystems geeignet ist. Mikro- bis mesoskopische Modelle entfallen daher.
- Die *Prognosefähigkeit* deklariert, ob die Modellart überhaupt in der Lage ist das Verhalten des Systems zu präzisieren.

In den Arbeiten von [Hughes et.al. 2015] wird festgestellt, dass entsprechend dem avisierten Auflösungsgrad und der erforderlichen Prognosefähigkeit ausschließlich mathematische und systemtheoretische Modelle zur Anwendung kommen können. Diese Modellarten definieren sich wie folgt:

- *Mathematische Modelle*

Mathematische Modelle nutzen empirische Daten der Verkehrsstatistik (sog. Zeitreihen) und deren Beziehung zueinander. Hieraus lässt sich gezielt die Wirkbeziehung im Hinblick auf zu ergreifende Maßnahmen identifizieren und aufgrund der mathematisch-funktionalen Zusammenhänge eine Prognose erstellen. In mathematischen Modellen sind die Eingangsgrößen daher diskrete Zeitreihen des zu prognostizierenden Systems (vgl. Abbildung 4-1).

- *Systemtheoretische Modelle*

Systemische Modelle bilden die Wirkbeziehungen und Kausalitäten des Verkehrssystems im relevanten Auflösungsgrad ab und ermöglichen ebenfalls Aussagen hinsichtlich des zukünftigen Verhaltens des Verkehrssystems. Der zentrale Unterschied zu mathematischen Modellen besteht darin, dass systemtheoretische Modelle das Verkehrssystem mit den relevanten Wirkmechanismen (*White Box*) abbilden (vgl. Abbildung 4-1) [Hughes et.al. 2015]. Systemtheoretische Modelle beschreiben i.d.R. das Verkehrssystem mittels kontinuierlicher mathematischer Zusammenhänge.

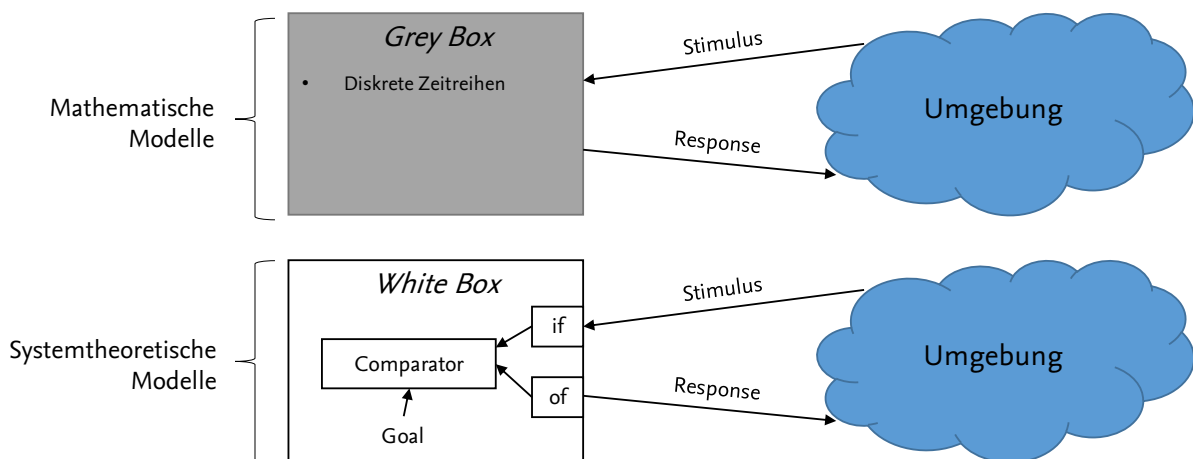


Abbildung 4-1: Grundlegende Konzepte mathematischer und systemtheoretischer Modelle der Verkehrssicherheit

Nachdem nun anwendbare Modellarten für die Prognose der Verkehrssicherheit identifiziert sind, wird in den folgenden beiden Abschnitten 4.3 und 4.4 auf Prognoseverfahren eingegangen, welche diese Modellarten nutzen.

4.3 Datenbasierte Prognoseverfahren

Bevor auf die datenbasierten Prognoseverfahren eingegangen wird, ist es erforderlich die Begrifflichkeit „Verfahren“ näher zu erläutern: Ein Verfahren im Sinne dieser Arbeit stellt die Kombination einer Methode mit einem konkreten Beschreibungsmittel (hier ein Modell, siehe Definition in Abschnitt 4.2) dar. Dies wird bereits ausführlich im Rahmen des sog. BMW-Prinzips in den Arbeiten von [Schnieder 1999] beschrieben. Verfahren sind daher nicht orthogonal hinsichtlich der Austauschbarkeit der verwendeten Methoden und Beschreibungsmittel, wohingegen die Werkzeuge zur Durchführung des Verfahrens nicht bindend sind. Folgend wird auf die relevanten datenbasierten Prognoseverfahren für diese Arbeit eingegangen.

Im Stand der Forschung lassen sich primär datenbasierte Prognoseverfahren finden, welche mathematische Modelle nutzen [Hauer 2010]. Das für die Prognose der Verkehrssicherheit weit verbreitete Regressionsverfahren nutzt häufig nur eine vorgegebene Zeitreihe und identifiziert

eine Regressionsfunktion, die eine prognostische Aussage über das mögliche Verkehrssystemverhalten zulässt. Diese mathematischen Modelle nehmen zumeist einen makroskopischen Fokus ein. Allerdings lässt diese Art der klassischen Verfahren der Zeitreihenanalyse nur begrenzt eine Wirkungsanalyse anderer Einflussfaktoren auf das Systemverhalten zu [Brüde 1995] [Hauer 2010]. Elaboriertere mathematische Prognoseverfahren, wie nichtlineare Autoregressionsanalysen oder probabilistische Verfahren, liefern validere Ergebnisse. Diese sind jedoch nur bedingt für eine gleichzeitige Korrelation mit weiteren Zeitreihen geeignet [Son et. al. 2011] [Yannis et.al. 2011]. Es wird im Folgenden auf klassische Methoden der Zeitreihenanalyse eingegangen, danach wird auf elaboriertere Verfahren aus den Bereichen der Parameterschätzung (vgl. Abschnitt 4.3.2), der Anwendung künstlicher neuronaler Netze (vgl. Abschnitt 4.3.3) und stochastischer Ansätze (vgl. Abschnitt 4.3.4) für die Prognose der Verkehrssicherheit eingegangen.

4.3.1 Zeitreihenanalysen

Es lassen sich bereits im alten Ägypten Methoden der Zeitreihen-Analyse finden, mit denen der Wasserstand des Nils dokumentiert und analysiert wurde [Kreis u. Neuhaus 2006]. Unter dem Begriff der „Zeitreihe“ wird heute eine Folge von diskreten, äquidistanten Größenwerten verstanden, welche zuvor gesammelt und dokumentiert wurden [Kreis u. Neuhaus 2006]. Die Schwierigkeit einer Zeitreihenprognose liegt darin, dass oftmals die betrachteten Systeme einem nichtlinearen Verhalten zugrundeliegen und hohe oszillierende Schwankungen bestehen [Kayacan et.al. 2010]. Unterschiedliche Fachdisziplinen nutzen Verfahren der Zeitreihen-Analyse für die Prognose späterer Ereigniszustände. Folgend werden die Verfahren der klassischen Zeitreihenanalyse vorgestellt.

Exponentielle Glättung

Das Verfahren der exponentiellen Glättung ist ein einfaches rekursives Verfahren aus der Statistik. Das Verfahren prognostiziert aus aktuellen und vergangenen Daten das künftige Verhalten. Die exponentielle Glättung wird als plausible Prognosemethode angesehen bei Zeitreihenverläufen ohne Trends oder saisonalen Schwankungen. Als optimal werden solche Verläufe bezeichnet, die mit mehr oder weniger Oszillationen um einen konstanten Wert schwanken [Alicke 2003] [Vogel 2015].

Das Verfahren definiert zuerst einen Glättungsfaktor ϵ , der häufig zwischen 0,1 und 0,3 liegt, welcher steuert, wie stark eventuelle Verhaltens-Schwankungen nachgebildet werden sollen [Alicke 2003]. Neben dem Glättungsfaktor wird ein Startwert benötigt, welcher häufig dem arithmetischen Mittel der Zeitreihe entspricht und mit dem das rekursive Verfahren beginnt [Vogel 2015]. Die neuen Werte werden mittels einer mathematischen Gleichung ermittelt, die sowohl den aktuellen, als auch den zuletzt betrachteten, bzw. berechneten, Wert beinhaltet. Die grundlegende Berechnungsformel der exponentiellen Glättung 1. Ordnung lautet:

$$\hat{x}_t = \epsilon * x_t + (1 - \epsilon) * \hat{x}_{t-1} \quad (4.1)$$

mit

$\epsilon \in [0,1]$ der Glättungsfaktor,

\hat{x}_t der erhaltene, geglättete Wert und

x_t der Originalwert.

Die Rekursivität des Verfahrens ergibt, dass bereits neu berechnete Werte mit in die weitere Prognose einbezogen werden. Aktuelle Daten der Zeitreihe werden stärker für die Prognose gewichtet als länger zurückliegende Daten. Originaldaten werden hierdurch exponentiell geglättet und der letzte Glättungswert bildet den Ausgangspunkt für die nachfolgenden Prognosewerte. Das Verfahren weist zumeist nur eine Eignungsfähigkeit für kurze Zeithorizonte auf, dieser ist praktisch von den enthaltenen Zahlenwerten in der Zeitreihe abhängig. Das Verfahren wird allgemein als geeignet evaluiert, wenn der betrachtete Zeithorizont nicht mehr als ein Jahr prognostiziert [Alicke 2003].

Für eine Prognose in der Verkehrssicherheit eignet sich dieses Verfahren nur bedingt, da die Prognosewerte nur von einem einzigen Ausgangswert abhängen und damit die zugrundeliegende Komplexität des Verkehrssystems nicht ausreichend modelltheoretisch abgebildet wird. Ein mathematisches Konzept, welches mittels einer Zeitreihe die Erwartungswerte bestimmt, ist somit für eine Verkehrssicherheitsprognose nicht plausibel. Es lässt sich somit folgern, dass die Methode der exponentiellen Glättung für die modellbasierte Prognose in dieser Arbeit nicht geeignet ist.

Methode der kleinsten Quadrate

Die Methode der kleinsten Quadrate ist eine häufig verwendete Methode in der Statistik, mit der Parameter einer Funktion zur Systemidentifikation geschätzt werden können. Sie wurde bereits 1795 von Gauß eingeführt [Leiner 2004]. Da mittels der Methode der kleinsten Quadrate die Parameter einer Funktion bestimmt werden, lässt sich auf Basis der extrapolierten Funktion ebenfalls eine Prognose des Systemverhaltens durchführen.

Grundsätzlich werden bei der Methode der kleinsten Quadrate lineare Modelle betrachtet. Voraussetzung für die Anwendbarkeit sind äquidistante Daten. Die Methode ermittelt aus einer Datenpunktwolke (hier die Zeitreihe) eine Kurven-Funktion, die möglichst nahe an den Datenpunkten selbst verläuft. Dazu wird eine Summe der jeweiligen quadratischen Abstände der Datenpunkte mit dem noch zu schätzendem Erwartungswert gebildet. Das hier verfolgte Konzept ist dabei, die erhaltene Quadratdifferenz zu minimieren. Die Differenz zwischen den Variablen und dem Erwartungswert kann auch als Fehler oder Residuen verstanden werden. Durch die Minimierung der Summe der Abweichungsquadrate kann mittels der Methode der kleinsten Quadrate eine Prognose ermöglicht werden [Holling u. Gediga 2013] [Leiner 2004]. Neben den einfachen Anwendungen der Methode der kleinsten Quadrate für lineare Modelle (mit linearen oder polynomialen Verläufen), gibt es elaboriertere Verfahren, die für nichtlineare Modelle angewendet werden können. Hier wird wiederum der Bereich der klassischen Zeitreihenanalyse verlassen und die Verfahren finden zumeist Anwendung in der sog. Systemidentifikation, bzw. den Parameterschätzverfahren. Diese werden im Abschnitt 4.3.2 weiter diskutiert.

Die Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate für lineare Modelle ist im Rahmen der Prognose der Verkehrssicherheit daher ungeeignet. Zwar qualifizieren sich die Zeitreihen der Verkehrsstatistik für die Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate, aber die einfache zugrundeliegende Modellkomplexität erfüllt nicht den Anspruch die komplexen Wirkbeziehungen des Verkehrssystems nachzubilden. Weiterhin sieht das mathematische Konzept nicht vor, korrelative/kausale Zusammenhänge unterschiedlicher Zeitreihen miteinander in Verbindung zu bringen – dies ist wiederum eine Mindestanforderung an die zu entwickelnde modellbasierte Prognose. Eine Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate ist daher für die Zielsetzung dieser Arbeit nur bedingt geeignet.

Gleitender Durchschnitt

Die Methode zur Glättung von Zeitreihen, auch gleitender Durchschnitt genannt, wird oftmals für die Analyse von Zeitreihen genutzt, die einen konstanten saisonalen Charakter besitzen oder gänzlich ohne Saisonalität auskommen. Die Methode findet heutzutage häufig Anwendung in der technischen Aktienanalyse und finanzwirtschaftlichen Prognosen [Pflaumer et al. 2005].

Grundsätzlich werden auch von dieser Methode die Mittelwerte einer gegebenen Zeitreihe betrachtet. Als Ergebnis des gleitenden Durchschnitts wird eine Reihe von arithmetischen Mitteln gebildet, die aus den gegebenen Zeitreihendaten berechnet wurde. Dabei wird zwischen einer geraden und ungeraden Anzahl von beobachteten Datenwerten unterschieden:

- Bei ungeraden Datenanzahlen ist das Resultat des Mittelwertes eindeutig einem Zeitpunkt zuzuordnen
- Bei geraden Datenanzahlen ist das Resultat des Mittelwerts nicht eindeutig einem Zeitpunkt zuzuordnen

Im letzten Fall wird eine Interpolation zwischen den benachbarten zuvor berechneten Mittelwerten vorgenommen. Folglich werden solange arithmetische Mittel der Nachbarwerte gebildet, bis das Ergebnis eindeutig einem Zeitpunkt zugeordnet werden kann [Treuer 2003] [Krämer 1999].

Die Anwendung der Methode des gleitenden Durchschnitts für die Prognose der Verkehrssicherheit scheint aufgrund der Komplexität des Verkehrssystems ungeeignet: Einerseits sind genaue Prognosen erwünscht, die vorliegenden Zeitreihendaten sind teilweise, vor allem in Bezug auf die saisonalen Schwankungen, zufällig angeordnet. Ohne fallenden oder steigenden Trend oder ohne gegebenen umfassenden, aussagekräftigen Anfangswert zeigt sich die Prognose mittels des gleitenden Durchschnitts als schwierig anwendbar. Mit steigender Systemkomplexität der betrachteten Zeitreihen ergeben sich für die Anwendung der klassischen Verfahren der Zeitreihenanalyse diverse, komplexe Gleichungen, die wiederum fehleranfällig sind und damit nicht mehr plausibel prognostische Erwartungswerte für das Systemverhalten bereitstellen können [Mao u. Chirwa 2006].

4.3.2 Parameterschätzverfahren

Ein weiteres Feld, mit dem es möglich ist ein Systemverhalten auf Basis von Zeitreihen-Analysen durchzuführen, stellen die Parameterschätzverfahren, oder auch die sog. Systemidentifikation, dar. Unter einem Parameterschätzverfahren ist die theoretische (oder experimentelle) Bestimmung quantitativer Abhängigkeit von Eingangs- zu Ausgangsgrößen eines Systems zu verstehen. Ziel ist dabei Gesetzmäßigkeiten für Modellparameter zu identifizieren, wobei gleichzeitig die Gesetzmäßigkeiten unbekannt sind. Die zur mathematischen Auswertung angewandten Verfahren können deterministisch oder stochastisch sein. Bei der theoretischen Parameterschätzung erfolgt die Modellbildung auf der Basis sog. Bilanzgleichungen unter Berücksichtigung von Erhaltungssätzen. Als Ergebnis wird eine funktionale Beziehung zwischen Ein- und Ausgangsgrößen durch ein beschreibendes Differentialgleichungssystem ermittelt. Zu den klassischen Methoden für die Identifikation relevanter Parameter zur Verhaltensbeschreibung des interessierenden Systems zählen u. a. die Regressionsanalyse, Markov-Schätzverfahren, Maximum-Likelihood-Schätzungen und Bayes-Schätzungen [Frank 1994] [Isermann 1994] [Schnieder 1999]. Diese Ansätze stammen primär aus dem Bereich der Regelungstechnik. Da diese zum Teil sehr stark elaboriert sind, wird die zugrundeliegende Definition von mathematischen Modellen zur

Verkehrssicherheitsprognose nicht mehr zugeordnet. Ein Beispiel für eine komplexe Durchführung einer Systemidentifikation mittels regelungstechnischer Verfahren findet sich in Abschnitt 5.3.4 zu den systemtheoretischen Verfahren der Verkehrssicherheitsprognose.

Es gibt eine Reihe weiterer Parameterschätzverfahren für die Prognose für nicht regelungstechnisch-spezifische Anwendungen, z. B. aus der Finanzwelt [Gerig 2006] oder die Prognose des Unfallsaufkommens [El-Basyouny u. Sayed 2009]. Eine im Bereich der Verkehrssicherheitsprognose und Wirkungsanalyse häufig angewendete Methode stellt die sog. Grey Systems Theory (GST) dar [Mao u. Chirwa 2006] [Wang et.al. 2012] [Omidvari u. Lashgray 2014]. Dieser Ansatz wird im Folgenden detailliert betrachtet: Der GST-Ansatz wurde in der 1980er Jahren von [Deng 1989] vorgestellt und zielt darauf ab, das Verhalten von Systemen zu modellieren, bei denen unvollständige Informationen über dessen Wirkweisen verfügbar sind [Liu u. Lin 2011] [Mao u. Chirwa 2006]. Das Verfahren der GST kann als vereinfachtes Parameterschätzverfahren zur Darstellung eines Systems im Zeitverhalten mittels kleinster Quadrate-Schätzung (vgl. Abschnitt 4.3.2) bezeichnet werden.

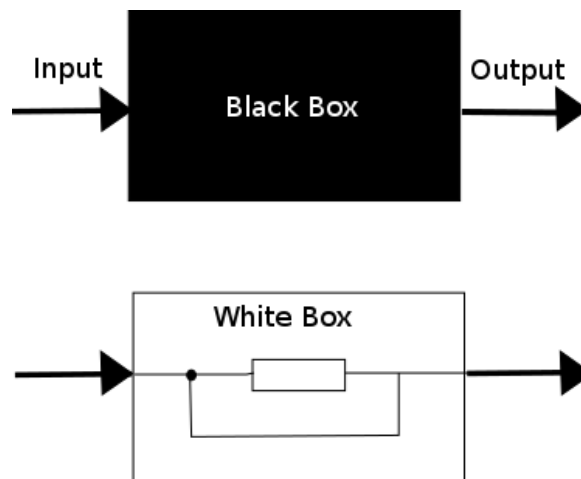


Abbildung 4-2: Darstellung und Vergleich einer Black Box und White Box

Der Ansatz von [Deng 1989] unterscheidet Grau-Systeme dahingehend, dass im Kontrast zu Weis-Systemen (White-Box-Systemen) oder Schwarz-Systemen (Black-Box-Systemen) ein gewisses Niveau an Informationen unbekannt ist [Liu u. Lin 2011] [Kayacan et.al. 2010]. Über Black-Box-Systeme liegt demzufolge gar keine Information über den Zusammenhang von Input- und Output-Größen vor, wohingegen ein White-Box-System vollständig beschrieben vorliegt, vgl. Abbildung 4-2.

[Deng 1989] definiert im Zuge dessen eine Reihe von Eigenschaften an die Systeme, welche mittels GST betrachtet werden können [Liu u. Lin 2011]. Diese Eigenschaften sind:

- Fehlende Informationen über einzelne Parameter des Systems
- Fehlende Informationen über die Struktur des Systems
- Unbekannte oder nicht eindeutige Systemgrenzen
- Nicht vollständig bekanntes Systemverhalten

Abhängig von der Art des Systems und dem Zeitreihenverhalten bietet die GST verschiedene Modell-Typen, die zumeist mit Grey-Modell (GM) abgekürzt werden. Dabei wird das allgemeine Modell $GM(R, N)$ benannt, wobei R die Ordnung der zu berechnenden Differentialgleichung angibt und N für die Anzahl der betrachteten Variablen steht. Diese Variablen sind als Zeitreihen

zu verstehen, die in das Modell einfließen [Liu u. Lin 2011]. Die Literatur liefert keine einheitliche Terminologie unter den einzelnen Modelltypen. Es lassen sich demzufolge modifizierte und weiterentwickelte GM-Modelle finden (sog. MGM), die nicht mehr dem Ursprungsmodell der GST entsprechen. So wurde beispielsweise ein modifiziertes Modell zweiter Ordnung als einfaches, ursprüngliches GM(2,1) bezeichnet [Mondal 2015]. Dies führt dazu, dass die Titel einzelner Fachartikel den Eindruck vermitteln, dass das betrachtete Grey Modell gute Prognoseergebnisse liefert, obwohl dabei fälschlicherweise ein bereits verändertes und angepasstes Modell angewandt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird sich auf die Terminologie von [Liu u. Lin 2011] gestützt, welche den ursprünglichen Ansatz nach Deng aufgreift.

Die Erstellung eines GM erfolgt zumeist nach dem folgenden Vorgehen:

1. Im ersten Schritt erfolgt eine Auswahl geeigneter Zeitreihen, die das System, bzw. den interessierenden Faktor, hinreichend beschreiben. Diese Zeitreihe muss aufgrund des mathematischen Modells der GST eine bestimmte Anzahl von positiven Werten beinhalten. Die Literatur gibt an, dass vier diskrete Werte ausreichend sind, damit ein GM erstellt werden kann. Die Werte der Zeitreihe müssen dabei äquidistant sein.
2. Im zweiten Schritt wird abhängig von dem gewählten GM-Modell eine Differentialgleichung (DGL) aufgestellt und gelöst, die sich aus den Zeitreihen-Werten und der Modellstruktur zusammensetzt. Dabei wird die sog. „Whitenization“-Formel betrachtet, die der zu lösenden DGL entspricht. Mit diesem Ausdruck werden die unbekannten Informationen über das Systemverhalten in einer Gleichung zusammengestellt und durch die Lösung sichtbar gemacht (daher die Namensgebung).
3. Im letzten Schritt der GM-Modellerstellung wird eine Gleichung definiert, mit der die zu prognostizierenden Werte berechnet werden können und ein kontinuierliches Abbild des Systemverhaltens darstellen [Kayacan et.al. 2010].

Laut der Literatur kann nach gewähltem GM eine beliebige Anzahl von Input-Zeitreihen an das Modell gegeben werden, vgl. Abbildung 4-3. Entsprechend der Lösung der „Whitenization“-Formel, liefert das GM eine kontinuierliche, mathematische Beschreibung des Systems. Eine detaillierte mathematische Beschreibung der verschiedenen GST-Modelle findet sich in [Liu u. Lin 2011].

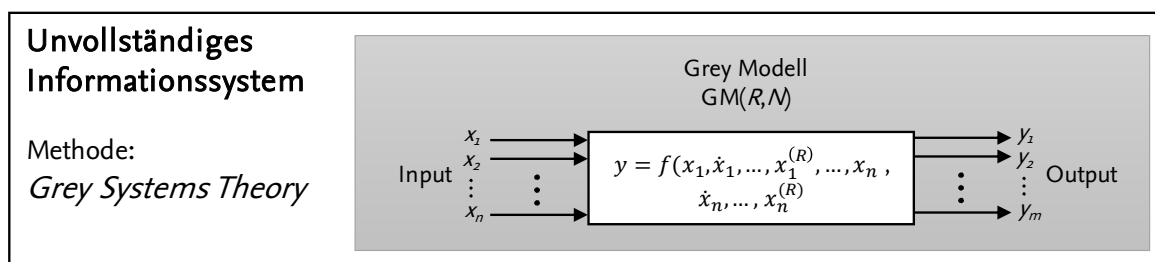


Abbildung 4-3: Prinzipieller Aufbau eines Grey-Modells

Eine vorläufige Qualifizierung der Modelle hinsichtlich der Eignungsfähigkeit für bestimmte Systemverläufe ist in der Arbeit von [Schnieder u. Hosse 2016] erfolgt und in der folgenden Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Einteilung der Grey Modelle und ihrer Merkmale, in Anlehnung an [Schnieder u. Hosse 2016]

Modell	Ordnung der DGL J	Variablen N	Merkmal
GM(1,1)	Erste Ordnung	1	geeignet für monotonen Verlauf
GM(2,1)	Zweite Ordnung	1	geeignet für schwankenden Verlauf
GM(1,n)	Erste Ordnung	n	nicht prognosefähig
MGM(1,n)	Erster Ordnung	n	modifiziert, prognosefähig
GM(2,n)	Zweite Ordnung	n	geeignet für schwankenden Verlauf, prognosefähig

Es gibt mittlerweile eine breite Basis von Anwendungsbeispielen der GST. Der Ansatz findet die größte Anerkennung aktuell im asiatischen Raum [Kayacan et.al. 2010]. So lassen sich Anwendungen für die Prognose von komplexen Systemen für ökonomische [Camelia 2015] [Chen u. Ting 2002] [Hui et.al. 2013] und ökologische Fragestellungen finden [Pai et al. 2007]. Häufig findet der Ansatz auch Anwendung für die Prognose von Aktienverläufen [Delcea Camelia et al. 2015]. Die Anwendung der GST für verkehrliche Fragestellungen, insb. der Verkehrssicherheit, fokussiert dabei zumeist auf die Vorhersage von Getöteten in Straßenverkehrssystemen [Mao u. Chirwa 2006]. Den Anwendungen im Rahmen der Verkehrssicherheit ist größtenteils gemeinsam, dass fehlerminimale Prognosen bereitgestellt werden können [Kayacan et.al. 2010]. Allerdings beschränken sich die meisten Anwendungsbeispiele auf das GM(1,1): Dieses liefert meist die plausibelsten Prognoseergebnisse und weist zusätzlich die beste rechnerische Effizienz auf [Kayacan et.al. 2010] [Wang et.al. 2012].

Für die Anwendung der GST im Rahmen dieser Arbeit scheint der Vorteil von GST darin zu liegen, dass direkt die zugrundeliegenden Systemstrukturen im Rahmen der Parameterschätzung des GM-Modells ermittelt werden. Dies ist vor allem bei nichtlinearen Modellverhalten von Vorteil, da dort die meisten klassischen statistischen Modelle versagen. Nach [Kayacan et.al. 2010] ermöglicht die GST die Abbildung zahlreicher Zeitreihen und so die Herstellung des Einflusses unterschiedlicher Systemeinflüsse auf die Verkehrssicherheit. Ein weiterer Vorteil der Methode GST besteht in der geringen erforderlichen Datenbasis zur Prognose des Systems [Kayacan et.al. 2010]. Des Weiteren müssen vor der Modell-Erstellung keine aufwendigen Systemannahmen getroffen werden, da lediglich die Originaldaten in das Grey-Modell einfließen [Mao u. Chirwa 2006]. Ein Nachteil besteht offensichtlich darin, dass bereits abhängig vom gewählten Grey-Modell ein zu erwartendes Systemverhalten vorgegeben wird.

4.3.3 Künstliche Neuronale Netze

Ein weiteres mathematisches Konzept zur Zeitreihenprognose stellen die künstlichen neuronalen Netze (KNN) dar, oder kurz Neuronale Netze (NN) genannt: Mitte der 1940er Jahre von McCulloch und Pitts als Formalmodell biologischer Neuronen vorgestellt, erfahren KNNs seit den 1980er zunehmenden Einsatz in der Zeitreihenprognose [Rey u. Wender 2011]. Grundsätzlich sind NNs als generische Modelle zu verstehen, die komplexe Systeme simulieren und verarbeiten können [Bothe 1998]. Mittels der Nutzung von Lernalgorithmen wird die Funktionalität

des Gehirns nachgeahmt, so verarbeiten NNs Informationen in Form von Zeitreihen, die als Input an das NN gegeben werden [Rey u. Wender 2011] [Kruse 2015] [Schneider 1993]. NN bestehen aus folgenden grundlegenden Elementen:

- *Neuronen*
NN besitzen mehrere Neuronen, benannt nach dem biologischen Vorbild. Innerhalb des neuronalen Netzes werden die Neuronen als Knoten bzw. Units definiert. Diese sollen Informationen speichern und weitergeben.
- *Kanten*
Die Kanten in dem NN geben die Mächtigkeit der Verbindung unter den Neuronen an. Diese werden mittels Gewichten skaliert. Die Gewichtung einer Kante kann positiv, negativ oder neutral sein. Bei positiven Gewichtungen entsteht ein erregender Einfluss der Verbindung von einem Neuron zu einem anderen. Bei negativer Gewichtung entsteht ein hemmender Einfluss. Wenn die Gewichtung neutral ist (Zahlenwert 0) besteht keine verstärkende oder schwächende Wirkung [Rey u. Wender 2011].

Abhängig von dem Anlernprozess, oder auch Training des NN wird das erlernte Wissen in den Gewichtungen der Kanten verortet. Entscheidend hierbei ist, dass die „richtigen“ Daten als Input verwendet werden, nur durch eine sinnvolle Auswahl der Input-Daten kann das NN angelernt werden [Rey u. Wender 2011]. Durch die Trainingsphase des NN erlernt dieses seine Aufgabe(n) zu lösen. Nur durch einen Test nach der Trainingsphase wird erkennbar, ob das NN die Fähigkeit erlernt hat, das avisierte Problem zu lösen. Auf Basis der in den Kanten gespeicherten Informationen kann das erlernte Wissen auf neue Datenreihen angewendet werden [Callan 2003]. Der Erfolg des Trainings ist dabei stark abhängig von folgenden Aspekten:

- Auswahl eines geeigneten Netzmodells
- Definition einer Netztopologie (Anzahl Neuronen und Kanten)
- Festlegung geeigneter Netzparameter [Callan 2003]

Aktuell finden Neuronale Netze verstärkt Anwendung in der visuellen Objekterkennung oder Spracherkennung. Das in dieser Arbeit relevante Einsatzgebiet NN betrifft die Zeitreihenanalyse. Daher wird im Folgenden kurz darauf eingegangen, wie mittels NN eine Zeitreihenprognose realisiert werden kann: Um mittels NN die Prognose einer gegebenen Zeitreihe durchzuführen, werden unabhängige Prädiktorvariablen als Netzininput genutzt. Zielsetzung hierbei ist es mit einer Kombination von n aufeinanderfolgenden Werten $x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-n}$ der Prädiktorvariable den Wert y_{t+1} der (abhängigen) Zielvariable vorherzusagen. Ein NN zur Zeitreihenprognose ist damit mit einem nichtlinearen Regressionsmodell vergleichbar [Thiesing 1998] [Zhang et.al. 1998] [Zell 1997]. Der mathematische Zusammenhang beschreibt sich wie folgt:

$$y_{t+1} = f(x_t; x_{t-1}; x_{t-2}, \dots, x_{t-n}) \quad (4.2)$$

mit

x Prädiktorvariable

y Zielvariable

Alle Kombinationen von n aufeinanderfolgenden Werten einer unabhängigen Variable ergeben sich aus einem gleitenden Zeitfenster der Breite n . Dabei ist die Berücksichtigung mehrerer Variablen unterschiedlicher Zeittiefe durchaus machbar. Das Training des NN erfolgt mit allen Eingabemustern und der abhängigen Variablen als Netzausgabe. Um nach erfolgtem Training

das Netz eine Prognose ausführen zu lassen, werden dem Netz für die Prognose der Zielvariablen zum Zeitpunkt $t+1$ das letzte bekannte Eingabemuster als Input gegeben. Das Netz berechnet daraufhin den Prognosewert der abhängigen Variablen y_{t+1} . Grundsätzlich kann man bei der Art der Prognose mittels neuronaler Netze zwischen vertikalen und horizontalen Prognosen unterscheiden. Sobald der funktionale Zusammenhang zwischen einer oder mehreren exogen gegebenen Zeitreihen hergestellt wird, ist dies als vertikale Prognose zu verstehen. Ergänzt man den funktionalen Zusammenhang der exogenen Variablen mit einer autoregressiven Komponente der Zielvariablen (endogene Zeitreihe) wird dies als horizontale Prognose bezeichnet, vgl. Abbildung 4-4.

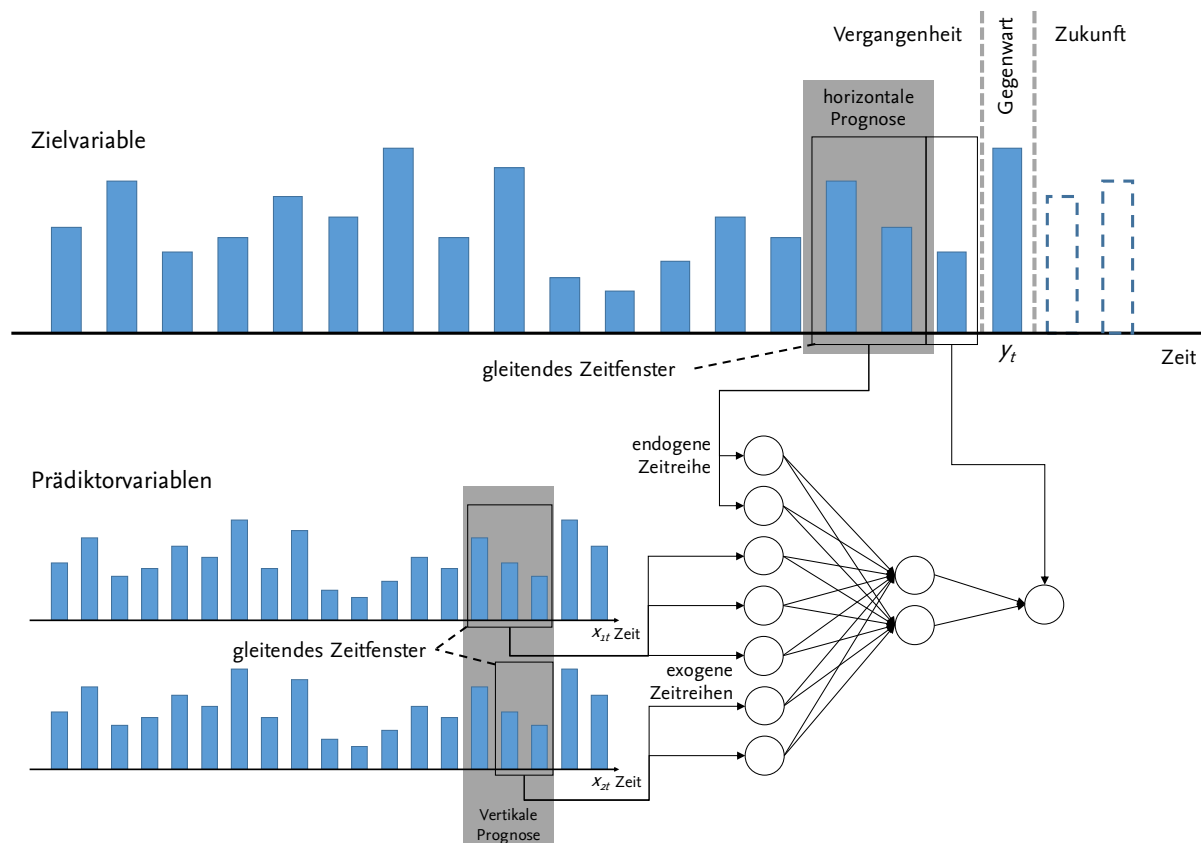


Abbildung 4-4: Analyse und Prognose von Zeitreihen mit künstlichen neuronalen Netzen anhand exogener Zeitreihen (vertikale und horizontale Prognose), in Anlehnung an [Thiesing 1998] und [Haar 2011]

Wie bereits erwähnt, lassen sich in anderen Anwendungsbereichen bereits zahlreiche Beispiele finden. Für die Prognose der Verkehrssicherheit zeigt der Stand der Forschung bisher noch nicht vollumfänglich die avisierte Anwendung der Verkehrssicherheitsprognose unter Berücksichtigung der Effekte ausgewählter Verkehrssicherheitsmaßnahmen. Die Arbeiten von [Kutylowska 2015] zeigen die Nutzung von NN für die Bestimmung von Fehlerraten im Verkehr, oder die Arbeiten von [Moghaddam et.al. 2011] nutzen die Methode zur Prognose von erwarteten Unfallschweregraden. Für die Anwendung einer makroskopischen Betrachtung des Verkehrssystems nutzen die Autoren [Liyan u. Chunfu 2009] [Qin u. Shao 2009] [Yu et.al. 2008] [Ogwueleka et.al. 2014] [Liyan u. Chunfu 2009] neuronale Netze zur Prognose des erwarteten Unfallschweregrads, allerdings spielt hier wiederum der Einfluss von Maßnahmen, also die Wirkungsanalyse,

keine Relevanz und ist nicht vorgesehen. [Babkin et.al. 2015] hingegen verwendet NN zur Strategiefolgenabschätzung politischer Entscheidungen, der Ansatz ist eher in den Bereich der Wirkungsanalysen einzuordnen.

Der Stand der Forschung zeigt, dass NN vielseitig einsetzbar sind und abhängig von Training und Auswahl geeigneter Inputs gute Ergebnisse liefern können. Als vorteilhaft kann sicherlich angesehen werden, dass die zugrundeliegende Methode der neuronalen Netze in der Lage ist auf Basis der vergangenen Zeitreihen selbstständig Muster und Kausalitäten im Systemverhalten zu erkennen, auf Basis dessen prognostische Aussagen getroffen werden können. Erwartete lange Trainingsphasen und die erforderlichen großen Datenmengen können aufgrund der Leistungsfähigkeit heutiger Tools als marginale Nachteile klassifiziert werden [Kayacan et.al. 2010].

4.3.4 Stochastische Prognoseverfahren

Neben den zuvor vorgestellten Verfahren der Verkehrssicherheitsprognose gibt es noch verschiedene Ansätze aus dem Bereich der Stochastik, sog. stochastische Prognoseverfahren. Die Stochastik repräsentiert dabei ein Teilgebiet der mathematischen Wahrscheinlichkeitstheorie (auch Probabilistik genannt). Die Stochastik kombiniert die Verfahren der Probabilistik mit der Statistik:

- Unter der Annahme, dass statistische Verteilungen stochastischen Prozessen unterliegen, können diese Zufallsverteilungen mittels stochastischer Verfahren modelliert werden
- Mittels der Numerik statistischer Verfahren können Kausalitäten für das Verhalten von Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt werden

Stochastische Verfahren ordnen bestimmten Zuständen eine Eintrittswahrscheinlichkeit P zu, diese variiert zwischen den Werten 1 und 0. Wobei 1 bedeutet, dass der Zustandseintritt als sicher bestimmt wird und 0 das Gegenteil darstellt (der unmögliche Zustand). Im Rahmen der Verkehrssicherheitsprognose finden stochastische Verfahren primär im Zusammenhang mit einer risikobasierten Betrachtung der Verkehrssicherheit statt. Für verkehrliche Fragestellungen definiert sich das Risiko R als Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeit P des Schadenzustands und der erwarteten Schadensschwere D . Der formale Zusammenhang sieht dabei wie folgt aus:

$$R = P \cdot D \quad (43)$$

Grundsätzlich kann demnach jede risikobasierte Betrachtung mittels stochastischer Verfahren als Prognose deklariert werden. Damit wären auch z. B. ASIL-Berechnungen im Rahmen der [ISO26262] eine bestimmte Art von Prognosen: Es wird hier für eine sicherheitsrelevante Komponente im Fahrzeug eine Risikoaussage getroffen, als wie wahrscheinlich in Zukunft ein menschlicher Verlust angenommen wird [Ständer 2011]. Diese Art der Verfahren ist wiederum für die interessierende Fragestellung nicht relevant.

Als bisher umfangreichste Anwendung einer stochastisch basierten Verkehrssicherheitsprognose kann das Forschungsvorhaben der BAST [Maier et.al. 2006] benannt werden: Ziel des Forschungsvorhabens war die quantitative Prognose des Verkehrsunfallgeschehens auf Basis empirischer Datengrundlagen aus dem Jahr 2006 für die Jahre 2015 und 2020 in Deutschland, siehe folgende Abbildung 4-5.

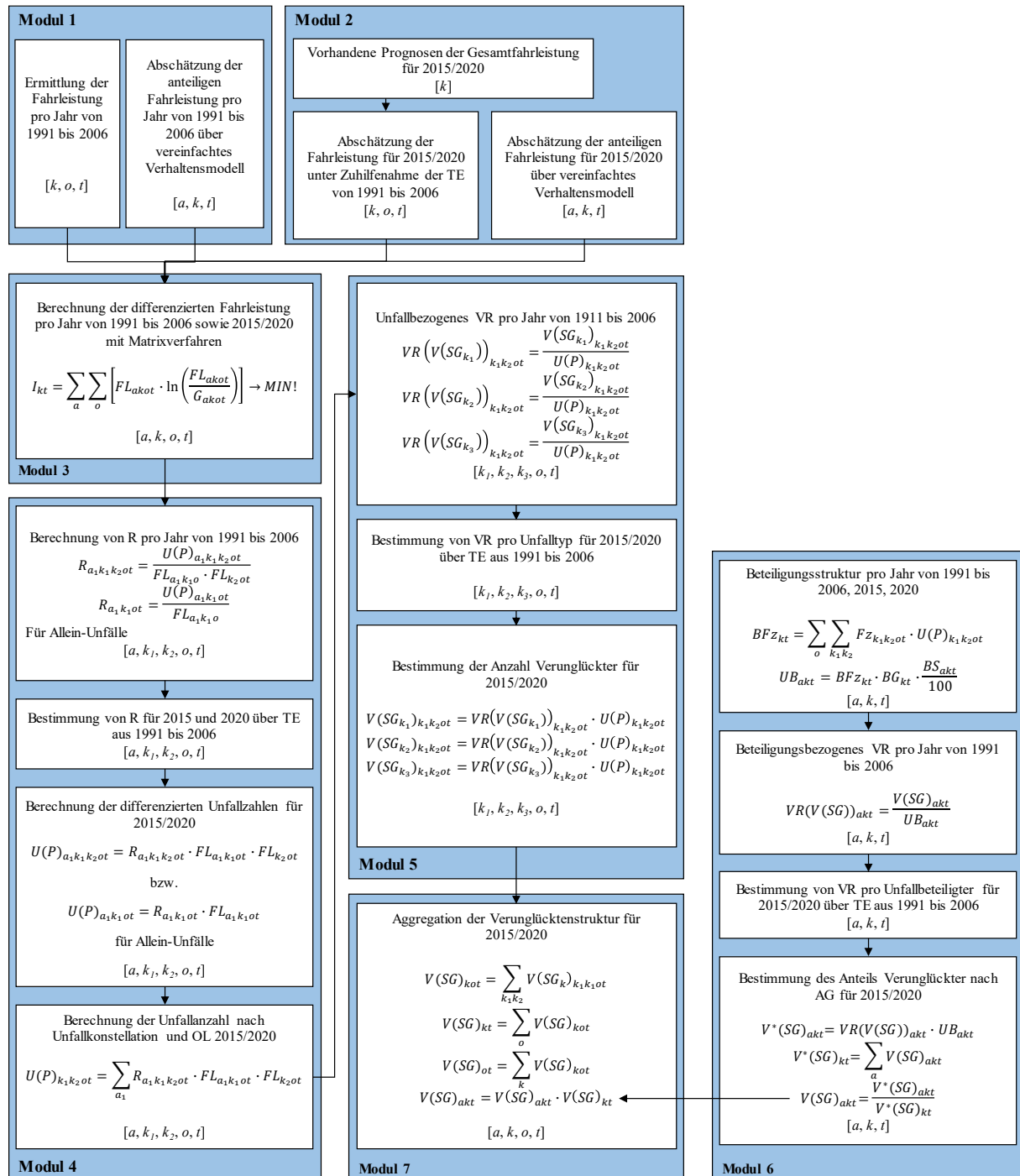


Abbildung 4-5: Modellstruktur zur stochastischen Prognose des Unfallgeschehens, nach [Maier et.al. 2006]

Das von der BASt [Maier et.al. 2006] entwickelte stochastische Prognoseverfahren erlaubt dabei eine Differenzierung des prognostizierten Unfallgeschehens nach

- Unfallschweregrad (leichtverletzt, schwerverletzt, getötet),
- Art der Verkehrsbeteiligung (Ortslagen, Unfallbeteiligte) und
- Alter der Verkehrsteilnehmer.

Der Anspruch des Vorhabens sah vor eine differenziertere Ursache-Wirkungs-Beziehung aufzubauen, als es bisher mit herkömmlichen Verfahren der Zeitreihenanalyse und deren Trendfort-

schreibung möglich ist: Auf Basis einer Risikoanalyse relevanter Unfallkonstellation unter Berücksichtigung der Art der Verkehrsbeteiligung erlaubt das Verfahren demnach nicht nur prognostische Erwartungswerte des Unfallgeschehens zu bestimmen, sondern mit Hilfe der vorliegenden Differenzierung kann auch der Einfluss sich ändernder Rahmenbedingungen (z. B. demografischer Wandel, vgl. Abschnitt 2.2.2) beurteilt werden. Das hier entwickelte Verfahren dient also gleichzeitig als Wirkungsanalyse. Das Prognosemodell wurde dabei modular aufgebaut, mittels Realisierung einer logischen und hierarchischen Modellstruktur durchläuft das Modell die Prognose sequentiell. Jede Berechnungssequenz erfolgt dabei auf Basis definierter Berechnungsvorschriften.

Da das Modell bisher am ehesten die avisierte Zielsetzung dieser Arbeit methodisch erarbeitet hat, wird im Folgenden eine kurze Methodenqualifizierung vorgenommen. Anhand der Tabelle 4-2 kann erkannt werden, dass das stochastische Prognosemodell der BAST für das Jahr 2015 relativ valide Erwartungswertaussagen bzgl. Entwicklung der Getöteten und Leichtverletzten getroffen hat. Hinsichtlich des Unfallaufkommens von Leichtverletzten weicht die Modellprognose um 1,5% vom Realwert ab. Die Entwicklung der Getöteten ist ca. 7,7% real schlechter als prognostiziert. Ein signifikanter Fehler zeigt sich bei der Prognose des Unfallaufkommens von Schwerverletzten. Hier weicht der ermittelte Erwartungswert um ca. 40% vom Realwert ab.

Tabelle 4-2: Vergleich des prognostizierten Unfallaufkommens zum realen Unfallaufkommen, in Anlehnung an [Maier et.al. 2006]

<i>Unfallart</i>	2006 in [N] (Realwert)	2015 in [N] (Prognose)	2015 in [N] (Realwert)	Abweichung in [%]
<i>Getötete</i>	5.091	3.213	3.459	7,66%
<i>Schwerverletzte</i>	74.502	48.484	67.706	39,65%
<i>Leichtverletzte</i>	347.835	320.833	325.726	1,53%

Im Hinblick auf den Prognosehorizont von 9, bzw. 11 Jahren trifft das Modell anteilig gute Aussagen. Es kann allerdings aufgrund des durchgeführten Vergleichs angenommen werden, dass nicht alle stochastisch/risikobasierten Prozesse im Modell hinreichend abgebildet worden sind. Dennoch liefert das Modell einen sehr guten Ansatz, welcher im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit weiterverfolgt werden sollte.

Ein weiteres stochastisches Modell der Verkehrssicherheit, welches prognostische Aussagen über das mögliche Systemverhalten treffen kann, ist das Modell der Risikogenese [Schnieder u. Schnieder 2013]. Dieses wurde bereits im Abschnitt 1.4 vorgestellt. Im Folgenden wird nun auf die Eignungsfähigkeit des Modells der Risikogenese als geeignetes stochastisches Prognoseverfahren für diese Arbeit eingegangen: Entsprechend dem Modell der Risikogenese entsteht ein unsicherer Zustand im Verkehrssystem durch einen Zustandsübergang verschiedener globaler Zustände und kann durch einen aggregierten Risikobegriff beschrieben werden: Ein Schadensereignis tritt ein, wenn ein exponiertes Gut (z. B. ein Verkehrsobjekt) mit einer latenten Gefährdung im Rahmen einer Gefährdungssituation auftritt. Wenn es zum physischen Kontakt kommt, tritt das Schadensereignis ein und endet in einem bestimmten Schadensausmaß. Aggregiert betrachtet, wird das Risiko R selbst als Summe aller einzelnen Schäden betrachtet. In einem bestimmten Bezugs(zeit)raum B definiert sich folglich das resultierende Risiko als Summe der Schadensfrequenz \bar{f}_d und der mittleren Schadenshöhe \bar{D} im Verkehr:

$$R = \sum_{i \in B} D_i = \bar{f}_d * \bar{D}, \quad (4.4)$$

mit

R	aggregiertes Risiko
B	Bezugs(zeit)raum
\bar{f}_d	mittlere Schadensfrequenz
\bar{D}	mittlere Schadenshöhe

Die Schadensfrequenz und -höhe definieren sich entsprechend dem Ansatz wie folgt:

- *Schadenshäufigkeit*

Die Schadenshäufigkeit kann mittels einer charakteristischen Verteilungsfunktion den zugrundeliegenden stochastischen Prozess beschreiben. Diese Verteilungsfunktion folgt dabei dem statistisch verteilten zeitlichen Unfallabstand T_b . Unabhängig von dem Schwereausmaß des Ereignisses zeigen die typischen Verteilungsfunktionen eine negative Exponential-, bzw. Log-Normalverteilung. Diese sind hochkorreliert [Buxhoeveden u. Becker 2016].

- *Schadensschwere*

Zur Beschreibung der Schadenshäufigkeitsverteilung auf Basis statistischer Erhebung ergibt sich die Schwierigkeit, dass i.d.R. Schadensschweren in diskreten Kategorien (leichtverletzt, schwerverletzt, getötet) definiert werden. Es gibt hierzu verschiedene Ansätze, die Schadensschwere auf eine einheitliche Metrik zu skalieren. Mittels der *Fatality Weighted Injuries* (FWI) lässt sich eine einheitliche Skalierung herbeiführen. Die FWI ordnet auf Basis der Zehnerregel jeder höheren Schadensstufe jeweils das Zehnfache der niederen Schadensstufe zu. Hieraus ergibt sich ein gewichtetes Schadensmaß auf Basis statistischer Daten.

Diese quantitative Beschreibung des sicheren Verkehrszustands kann jeweils auf spezifische Verkehrsmittel, Verkehrsobjekte, etc. bezogen werden. In aggregierter Perspektive können das Schadensausmaß und die Eintrittshäufigkeit auch als stochastische Prozesse verstanden werden. Eine exemplarische Erhebung der Verteilungen für eine Schadenshäufigkeits- und Schadensschwereverteilung lässt sich für ausgewählte Unfallereignisse im schweizerischen Schienen- und Straßenverkehr finden, vgl. hierzu [Buxhoeveden u. Becker 2016]. Auf Basis von Tages- und Monatsgängen von einzelnen Schadensereignissen kann eine Schwereausmaßverteilung und eine Schadensabstandsverteilung generiert werden. Diese Verteilungen können somit durch jeweils eine Verteilungsfunktion mathematisch beschrieben werden. Sobald die Bestimmung der jeweiligen Verteilungsfunktionen erfolgt ist, kann das Modell der Risikogenese konkret damit parametrisiert werden [Buxhoeveden u. Becker 2016].

In den Arbeiten von [Schnieder u. Schnieder 2013] und [Schnieder 2014] konnte gezeigt werden, dass eine Erweiterung des Modells der Risikogenese prinzipiell um den Einfluss von Verkehrssicherheitsmaßnahmen möglich ist. Eine konkrete Realisierung ist bisher nicht erfolgt. Die folgende Abbildung 4-6 zeigt exemplarisch die notwendigen empirischen Daten zur Ermittlung der Verteilungsfunktionen für das Schwereausmaß und die Schadenshäufigkeitsverteilung. Nachdem auf relevante datenbasierte Prognoseverfahren eingegangen worden ist, werden im Folgenden die modellbasierten Prognoseverfahren beleuchtet.

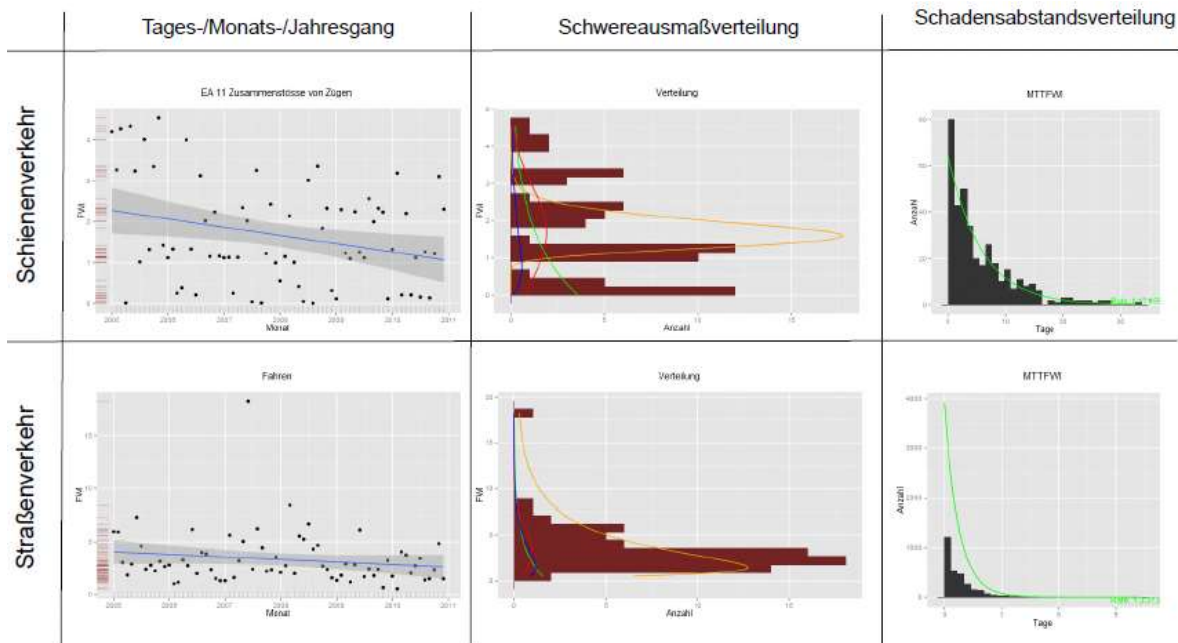


Abbildung 4-6 Statistische Erhebung zur Bestimmung der Verteilungsfunktionen für Schadensausmaß und Schadenshäufigkeit, nach [Schnieder 2014] [Buxhoeveden u. Becker 2016]

4.4 Modellbasierte Prognoseverfahren

Im Rahmen dieser Arbeit werden die modellbasierten Prognoseverfahren zwischen systemtheoretischen Verfahren (siehe Abschnitt 4.4.1) und hybriden Verfahren (siehe Abschnitt 4.4.2) unterschieden. Hybride Verfahren werden hier als modellbasierte Verfahren klassifiziert, weil diese gleichzeitig mehrere Verfahren zur Prognose der Verkehrssicherheit nutzen. Im Folgenden wird nur kurz auf die benannten Verfahren eingegangen, weil entscheidend bei der Anwendung modellbasierter Prognoseverfahren das zugrundeliegende Modellkonzept ist [Schnieder u. Schnieder 2013]. Die relevanten Modellkonzepte für die Verkehrssicherheitsprognose werden im sich anschließenden Kapitel 1 erläutert.

4.4.1 Systemtheoretische Verfahren

Das Gebiet der systemtheoretischen Verfahren bietet zahlreiche Beispiele der mikroskopischen bis makroskopischen Modellierungen unterschiedlicher Verkehrssysteme (Straße, Schiene, Luft), vgl. hierzu [Johnson 1980], [Stang 1996], [Porter u. Wettig 1999], [Leveson 2004], [Burns u. Machado 2009], [Whitefield 2009], [Larsson et. al. 2010], [Salmon et.al. 2012], [Goh et. al. 2012], [Read et.al. 2013]. Systemtheoretische Modelle unterscheiden sich von den mathematischen Modellen insofern, als dass sie kein mathematisches Modell basierend auf Zeitreihen nutzen, um die Prognose zu bestimmen. Systemtheoretische Modelle legen ein kybernetisches Modellkonzept dem betrachteten System zugrunde und modellieren das System mittels einer quantitativen Beschreibung der Wirkmechanismen. Das grundlegende kybernetische Modellkonzept sieht hierbei vor, dass das Verhalten eines Systems intendiert beeinflusst werden kann und demnach auch beschreibbar ist, vgl. Abschnitt 4.2.

Neben den quantitativen Verfahren gibt es auch qualitative systemtheoretische Verfahren. Diese sind im relevanten Kontext sog. Delphi-Verfahren: Auf Basis von Expertenwissen wird ein qualitatives Modell über die Wirkmechanismen eines Systems generiert und Aussagen über die Erwartungswerte getroffen. Dieser Typ von qualitativen systemtheoretischen Verfahren gewinnt

in der aktuellen Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme zwar an Bedeutung (vgl. [Leveson 2011], [Maurer et.al. 2015], [Hollnagel 2006], [Hollnagel 2006]), stellt aber für die Forschungsfrage dieser Arbeit keine nutzbare Basis dar. Daher kommen für die Durchführung der Verkehrssicherheitsprognose nur quantitative systemtheoretische Verfahren infrage.

4.4.2 Hybride Verfahren

Unter einem hybriden Modell wird klassischerweise die Modellierung eines kontinuierlich-diskreten Systems verstanden [Rojas 1993]. Ein Beispiel hierfür lässt sich in der Arbeit von [Welte 2012] finden, hier wurden diskrete Systemanteile mittels Petrinetzen [Petri 1962] dargestellt und kontinuierliche Systemanteile mittels System Dynamics [Forrester 1969]. Im Rahmen der Arbeit von [Welte 2012] wird der Begriff der hybriden Modelle dahingehend erweitert, dass unter einem hybriden Modell ein Modellkonzept verstanden wird, dass unterschiedliche mathematische und systemtheoretische Konzepte zur Modellierung von Systemen miteinander kombiniert. Daher wäre ein hybrides Modell im Sinne dieser Definition auch ein Modell, welches kontinuierliche Beschreibungsmittel (z. B. System Dynamics) mit wiederum kontinuierlichen Beschreibungsmitteln (z. B. Grey Systems Theory) kombiniert. Mit diesem Vorgehen ist es möglich die jeweiligen Vorteile der unterschiedlichen Modellkonzepte unabhängig der Trennung zwischen kontinuierlichen und diskreten Modellwelten zu erzeugen.

Entscheidend bei der Hybridisierung von Modellen ist das Integrationskonzept der Modellkonzepte, wie [Schnieder 2003] hervorhebt. Es gibt sechs unterschiedliche Arten der Integration unterschiedlicher Modellkonzepte zur Schaffung eines hybriden Modells:

- *Isolierte Integration:* Hierunter wird eine Zusammenstellung mehrerer gleichartiger isolierter Modelle verstanden, deren Integrationsfähigkeit sich durch eine Verknüpfungsfähigkeit darstellt.
- *Additive Integration:* Hierunter wird eine Zusammenstellung unterschiedlicher Modelle verstanden, die über eine gleiche Semantik (Bedeutungsverständnis) verfügen.
- *Kooperative Integration:* Hierunter wird eine Zusammenstellung unterschiedlicher Modelle verstanden, die eine bestimmte Eigenschaft/Funktion erst durch ihre Kombination erfüllen können. Einzeln sind die Modelle nicht in der Lage die Funktionalität bereitzustellen.
- *Integrative Integration:* Hierunter wird eine Zusammenstellung unterschiedlicher Modelle verstanden, die ihrerseits komplementär im Modellkonzept sind und durch die Integration nicht ihren originären Charakter verlieren. Hierunter ist der klassische Ansatz der Modellhybridisierung zu verstehen.
- *Transformative Integration:* Hierunter wird eine Zusammenstellung unterschiedlicher Modelle verstanden, wobei die ursprüngliche Form eines Modellkonzepts dominiert.
- *Abstrahierte Integration:* Hierunter wird eine Zusammenstellung unterschiedlicher Modelle verstanden, deren Integrationsprodukt in einem völlig neuen nicht mehr unterscheidbaren Ansatz aufgeht [Schnieder 2003].

Der Stand der Forschung scheint bisher noch wenig bis gar keine konkreten Anwendungen für die Zielsetzung dieser Arbeit zu enthalten. Zwar gibt es eine Reihe von hybriden Verfahren, die zum Teil sehr aufwändige Modelle entwickeln, doch werden diese zumeist zur strategischen Entscheidungsfindung für betriebswirtschaftliche Fragestellungen verwendet. So wurde z. B. in der Forschungsarbeit von [Kieckhäfer 2013] eine Modellhybridisierung zwischen System Dynamics und Agentensimulationen realisiert. Das Modell dient der strategischen Portfolio-Planung

für Automobilhersteller. Dabei hat das Modell einen makroskopischen Fokus. Der Aspekt der Verkehrssicherheit wird allerdings nur anteilig betrachtet und fließt als Teilaspekt in die Kaufentscheidung der Konsumenten ein. Die Arbeit von [Welte 2012] sieht schon eine Modellhybridisierung diskreter und kontinuierlicher Modellkonzepte zur Eruierung der Verkehrssicherheit vor, der betrachtete Systemfokus liegt dabei auf einer mesoskopischen Ebene. Die in [Welte 2012] adressierte Fragestellung fokussiert eher die Aspekte der Auslegung von Fahrerassistenzsystemen und die vorliegende Beherrschbarkeit von unterschiedlichen Fahrertypen.

Hybride Modelle scheinen folglich einen Vorteil hinsichtlich der Fragestellung zu geben, insofern die Möglichkeit unterschiedliche Modellkonzepte miteinander zu kombinieren, ein plausibleres Modell der Verkehrssicherheitsprognose ermöglichen wird. Es ist im Rahmen der Anforderungsermittlung an das Modell festzustellen, inwieweit unterschiedliche Modellkonzepte Vorteile für Teilaspekte des zu entwickelnden Modells generieren. Nachdem nun auf die datenbasierten und modellbasierten Prognoseverfahren eingegangen worden ist, kann im Folgenden eine Betrachtung der sog. Wirkungsanalysen erfolgen.

4.5 Wirkungsanalysen

Während die Technikfolgenabschätzung primär für die Bewertung von Maßnahmen für ein Gesamtsystem seitens politischer Entscheidungsträger genutzt wird (vgl. Abschnitt 4.1), zielen Wirkungsanalysen von Verkehrssicherheitsmaßnahmen primär auf den erwarteten Sicherheitsnutzen von aktiven oder passiven Verkehrsmittelmaßnahmen. Die Verfahren nutzen dabei zumeist Computersimulationsverfahren und In-depth Unfalldatenbanken, die einen hohen Grad an Informationen zu einzelnen Unfallereignissen beinhalten (z. B. GIDAS). Grundsätzlich lassen sich Wirkungsanalysen in *prospektive* und *retrospektive* Verfahren kategorisieren [Aioki et.al. 2009] [Bakker u. Hermann 2001] [Busch 2005] [Hannwald 2008] [Schramm u. Roth 2009]. Welche Art der Wirkungsanalyse zur Bewertung des erwarteten Sicherheitsgewinns einer Maßnahme anzuwenden ist, hängt vom Entwicklungsprozess und / oder dem Lebenszyklus der fraglichen Maßnahme ab [Bakker u. Hermann 2001]:

- *Prospektive Analysen* können bereits in sehr frühen Entwicklungsstadien angewendet werden, ohne die Notwendigkeit, über eine vollständig entwickelte Maßnahme zu verfügen
- *Retrospektive Analysen* können verwendet werden, sobald eine Maßnahme entwickelt ist. Dies trifft üblicherweise zu, wenn die Maßnahme bereits auf dem Markt für eine gegebene Zeitspanne verfügbar ist [Schramm u. Roth 2009]

Bei der konkreten Prognose des Sicherheitsnutzens einer Maßnahme sind zwei Parameter entscheidend: Das Wirkfeld und das Sicherheitspotential. Im Folgenden wird kurz auf die Begrifflichkeiten und dahinterstehenden Konzepte eingegangen, um dann im Detail prospektive und retrospektive Verfahren der Wirkungsanalyse darzustellen: Nicht jede im Verkehrsmittel (oder an einem anderen Verkehrskonstituenten) ergriffene Maßnahme, wirkt auf jede Fahrsituation gleichzeitig ein. Es gibt bestimmte Anwendungsfälle, in denen eine Sicherheitsmaßnahme einen Effekt erzielen kann. Diese Anwendungsfälle werden als Wirkfeld (area of action) bezeichnet. Ein Wirkfeld umfasst alle relevanten Unfälle, auf die eine Sicherheitsmaßnahme Einfluss haben kann. Dabei kann das spezifische Wirkfeld je nach Spezifikation einer Maßnahme unterschiedlich ausfallen (z. B. unterschiedliche Parametrierung gleichartiger Maßnahmen von unterschiedlichen Fahrzeugherstellern). Das Wirkfeld stellt somit im Ergebnis die maximal erreichbare Menge an Anwendungsfällen dar, welche von einer Maßnahme adressiert werden kann. Die

tatsächlich resultierende Effizienz einer Maßnahme ist hingegen von dem Sicherheitspotential abhängig.

Die in dieser Arbeit verwendete Definition des Sicherheitspotentials wurde bereits in Abschnitt 1.1 vorgestellt. Es ist festzuhalten, dass dieser Begriff nicht einheitlich im Stand der Forschung definiert ist. Das Sicherheitspotential nach der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) definiert das Sicherheitspotential als die vermeidbaren, volkswirtschaftlichen Verluste pro Kilometer und Jahr bezogen auf bauliche Maßnahme in ausgewählten Verkehrsinfrastrukturbereichen. Das hier definierte Maß soll einen Indikator bereitstellen, der Entscheidungsträgern das finanzielle Investment in bauliche Maßnahmen an unfallträchtigen Straßenabschnitten im Vergleich zum erwarteten Sicherheitsnutzen (Unfallkostendichte) setzt. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Sicherheitspotential orientiert sich an der Definition nach der BASt. Das Sicherheitspotential nach der BASt drückt aus, wieviel relevante Unfallereignisse durch Verwendung einer Maßnahme im betreffenden Wirkfeld maximal gemindert werden können. Demnach drückt sich das Sicherheitspotential als Differenzbetrachtung zwischen dem vorliegenden Unfallaufkommen ohne betreffende Maßnahme zum Unfallaufkommen mit der betreffenden Maßnahme aus. Folgend wird nun auf Verfahren der retrospektiven Wirkungsanalyse eingegangen.

4.5.1 Retrospektive Wirkungsanalysen

Ähnlich den mathematischen Prognosemethoden verwenden retrospektive Wirkungsanalysen hauptsächlich reale Unfalldaten (sog. aggregierte Daten) und bewerten im Verkehrssystem befindliche Maßnahmen in Bezug auf eine statistische Erhebung. Eine übliche Vorgehensweise besteht darin, zwei Gruppen in den Unfalldaten zu definieren, eine mit der betreffenden Maßnahme und die andere ohne. Die beiden Gruppen werden dann auf der Suche nach Änderungen der Merkmalswerte in der Statistik miteinander verglichen [Hannwald 2008], [Schramm u. Roth 2009]. Die Literaturrecherche bestätigt, dass die retrospektive Vorgehensweise eine valide Methode der Wirkungsanalyse darstellt, vgl. [Hannwald 2008] [Schramm u. Roth 2009]. Eine Zusammenfassung verfügbarer Studien ist in [Kreiss et.al. 2011] enthalten. Methodisch nutzen die Verfahren der retrospektiven Wirkungsanalyse mathematische Verfahren der Statistik. Es werden Korrelationen zwischen der Einführung von Maßnahmen und der Sichtbarkeit der Sicherheit hergestellt.

Frühere Studien wiesen auf die Schwäche retrospektiver Verfahren hin, dass es z. T. Jahre dauert, bis sich die Sicherheitseffekte als stabil erweisen oder diese gar nicht erst sichtbar werden [Kreiss et.al. 2011]. Demnach weisen retrospektive Wirkungsanalysen eine Reihe von Einschränkungen auf:

- Die Sicherheitsmaßnahme muss auf dem Markt mit einer ausreichenden Marktdurchdringung sein, um sichtbare Auswirkungen in Unfalldaten zu haben [Fach u. Ockel 2009], [Hannwald 2008], [Kreiss et.al. 2011], [Breuer 2002] und [Fastenmeier et.al. 2001]. Die Marktdurchdringung ist von der Taktrate einer Maßnahme abhängig und daher für jede Maßnahme individuell [Van Auken et.al. 2011] [Aioki et.al. 2009] [Schramm u. Roth 2009] [Kreiss et.al. 2011].
- Das Vorhandensein der Maßnahme muss in den Einzelereignis-Unfalldaten [Kreiss et.al. 2011] erkennbar sein, um die Unfälle zu gruppieren. Weiterhin muss erkennbar sein, ob z. B. vom Fahrer eine deaktivierbare Maßnahme zum Unfallzeitpunkt aktiviert gewesen ist oder nicht.

- Die Referenzgruppe, gegen die der Sicherheitseffekt ermittelt wird, kann durch Beinahe-Unfälle verzerrt werden; diese Art von Unfällen sind bisher nicht in Unfallstatistiken enthalten [Bakker u. Hermann 2001] [Busch 2005] [Kreiss et.al. 2011].
- Wahrscheinliche Wechselwirkungseffekte mit anderen Maßnahmen im Verkehrssystem können den untersuchten Effekt maskieren: Dazu müssen mögliche Wechselwirkungseffekte bekannt und kontrolliert werden [Kreiss et.al. 2011] [Zangmeister et.al. 2009]. Die Steuerung von den Wechselwirkungen ist nur möglich, wenn diese in den verwendeten Datensätzen verfügbar sind. Interaktionseffekte sind gleichzeitig noch schwieriger zu kontrollieren, wenn die Daten eine große Zeitspanne abdecken und sich die internen Einflüsse auf Verkehr und / oder Unfälle in diesem Zeitraum ändern können [Bakker u. Hermann 2001].

4.5.2 Prospektive Wirkungsanalysen

Die Motivation in prospektiven Wirkungsanalysen liegt in der Bewertung der Sicherheitsvorteile einer Maßnahme vor ihrer Markteinführung [Bakker u. Hermann 2001], [Schramm u. Roth 2009]. Im Gegensatz zu retrospektiven Wirkungsanalysen wird nur eine Gruppe aus den Daten anstelle von zwei ausgewählt. Diese Gruppe wird dann auf theoretischer Basis mit und ohne die fragliche Maßnahme bewertet und so ein Erwartungswert für das zukünftige Verhalten im Verkehrssystem geschlossen [Hannwald 2008]. Methodisch nutzen dabei die prospektiven Wirkungsanalysen die Verfahren der Verkehrssimulation mit den dazugehörigen Tools (PC-Crash, CarMaker, VISSIM, etc.). Es wird das reale Verkehrsgeschehen im Rahmen einer virtuellen Umgebung in mikro- bis mesoskopischer Systemperspektive abgebildet. Das zugrundeliegende Modellkonzept der prospektiven Wirkungsanalysen ist demnach ein systemtheoretisches Modellkonzept (vgl. 5.1.4). Die Vorteile einer prospektiven Wirkungsanalyse im Allgemeinen sind:

- Anwendbar mit dem Beginn der Maßnahmenentwicklung, bzw. diese darf nicht bereits im Markt verfügbar sein [Fach u. Ockel 2009], [Hannwald 2008].
- Es können verschiedene Parametrierungen einer Maßnahme verglichen werden und wieder in die Entwicklung, bzw. Markteinführung, eingebunden werden [Schramm u. Roth 2009].

Seit 2005 wurden einige prospektive Wirkungsanalysen entwickelt, mit zum Teil unterschiedlichen Leistungsmerkmalen und Zielsetzungen. Zu den bekanntesten Methoden der prospektiven Wirkungsanalyse zählen:

- Simulation von [Busch 2005]
- PreScan [Lenemann et.al. 2008]
- Bosch Simulation [Zimmermann et.al. 2009]
- VUFO Simulation [Liers 2010]
- PreEffect-iFGS [Schramm 2011]
- rateEffect [Kohsiek et.al. 2011]
- ACAT Simulation [Van Auken et.al. 2011]

Allen Verfahren gemein ist, dass letztlich eine automatisierte Einzelfallanalyse mit geeigneten Computer-Tools und einer Schnittstelle zu verschiedenen in-Depth Unfalldatenbanken durchgeführt wird. Es werden real aufgetretene Unfallereignisse virtuell erneut abgebildet und mit der zu betrachtenden Maßnahme simulativ erneut durchlaufen. Die Ergebnisse der Simulation liefern daraufhin eine Aussage hinsichtlich der zu erwartenden Unfallschweren und Eintrittswahrscheinlichkeiten durch Einsatz der neuen Maßnahme. Die Verfahren sind dabei in der Regel modular aufgebaut:

- *Simulations-Modul*

Das erste Modul realisiert die virtuelle Umgebung, in der der Unfall simuliert werden soll. Dabei muss die Simulation in der Lage sein die vorkollisionäre Phase auf Basis der In-Depth Unfalldaten so realitätsgetreu wie möglich nachzubilden. Mit elaborierten Tools, wie PC-Crash, lässt sich zeigen, dass die Unfälle in ihrer digitalen Rekonstruktion annähernd fehlerfrei codierbar sind und eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Realität und Simulation erzielt werden kann.

- *Maßnahmen-Modul*

Auf Basis des virtuellen Unfallereignisses lässt sich im Maßnahmen-Modul ein virtueller Prototyp der Funktionalität der gefragten Maßnahmen integrieren. Hierdurch lässt sich analysieren, wie sich jeder einzelne der betrachteten Unfälle im relevanten Wirkfeld der Maßnahmen durch die Verwendung der entsprechenden Maßnahme verbessert oder verschlechtert hätte. Durch den Vergleich dieser virtuellen Testfälle mit und ohne die Maßnahme lässt sich ein differenziertes Bild über das erwartete Sicherheitspotential der Maßnahme bestimmen.

- *Unfallschweren-Modul*

Sobald die Simulation die veränderten physikalischen Größen des Unfallereignisses durch Einsatz der Maßnahme bestimmt hat, kann eine Bestimmung der erwarteten Verletzungsschweren erfolgen. Im Rahmen der Simulation werden folglich die einwirkenden Kräfte auf die virtuellen Insassen abgebildet und bestimmt, welche Verletzungsschweren (zumeist gemessen als AIS) erwartet werden.

Neben der Verwendung zur Bestimmung der erwarteten positiven Effekte auf die Verkehrssicherheit werden die Verfahren auch genutzt, um optimale Kosten-Nutzen-Verhältnisse der technischen Systeme herzustellen. Im Stand der Forschung lässt sich bisher kein Ansatz finden, der die Erkenntnisse aus den Wirkungsanalysen auf eine makroskopische Systemperspektive erhoben hat.

4.6 Schlussfolgerungen

Aus der vorhergehenden Darstellung der relevanten Modellarten und Prognoseverfahren lassen sich Schlussfolgerungen formulieren, die einen Einfluss auf die Wahl geeigneter Modelle und Verfahren im Rahmen dieser Arbeit haben: Hinsichtlich der grundlegenden Prognoseproblematik (vgl. Abschnitt 4.1.3) lässt sich schlussfolgern, dass *Prognosen im engeren Sinne* bedingt geeignet zur Nebenfolgenabschätzung sind. Die Notwendigkeit nach einem umfassenden Systemverständnis hinsichtlich der geltenden Gesetzmäßigkeiten mindert die Anwendungsmöglichkeiten dieser Prognosen für verkehrliche Fragestellungen, insbesondere in komplexeren Verkehrssystemen. *Prognosen im weiteren Sinne*, insbesondere die Trendprognosen, sind eine weit verbreitende Methode zur Bestimmung von Erwartungswerten für verkehrliche Fragestellungen, auch hinsichtlich der Verkehrssicherheit. Um eine hohe Qualität der Aussagen sicherzustellen, bedarf es hier einer hinreichenden Begründung der Auswahl der Trendpräferenzen.

Um nun dem inhärenten Prognoseproblem entgegenzuwirken, sind Anforderungen an die durchzuführende Prognose der Verkehrssicherheit zu treffen: Verkehrssicherheit repräsentiert letztlich die Abwesenheit von unerwünschten Unfallereignissen (vgl. Abschnitt 1.1). Dieses Systemverhalten ergibt sich erst aus dem Zusammenspiel einer Vielzahl individueller Akteure und Einzelentscheidungen. Gleichzeitig stellt die Verkehrssicherheit ein gemeinsames Ziel der beteiligten Verkehrsteilnehmer dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass kein Verkehrsteilnehmer am Verkehr teilnimmt mit der Motivation zu verunglücken (ausgenommen suizidal-

motivierte Verkehrsteilnehmer). Insofern kann der Prognose der Verkehrssicherheit die Gesetzmäßigkeit zugrundegelegt werden, dass es das Ziel ist diese kontinuierlich zu verbessern (Werthaltung). Prognosen in anderen Anwendungsgebieten, wie z. B. der Börsenkursprognose, sind im Gegensatz dazu chaotischer und komplexer organisiert: die Zielgröße des komplexen Systems Börse ist für nicht alle am System beteiligten Akteure die gleiche. Der Börsenwert kann nur steigen oder fallen, das Interesse der am Markt agierenden Händler ist aufgrund einer Vielzahl unterschiedlicher Finanzprodukte (z. B. Hebelprodukte) nicht identisch – so kann auch aus einem Kursverlust ein Profit gezogen werden. Das Verkehrssystem ist ein synthetisches System (bzw. menschen-geschaffenes System) mit einer endlichen Anzahl von Einflussfaktoren. Die Verkehrssicherheit weist daher einen gewissen Grad an intendierter Steuer-, bzw. Regelbarkeit, auf und stellt eine kollektiv-einheitlich wahrgenommene Sollgröße des Systems dar [Schnieder u. Schnieder 2013].

Auf Basis der Erhebung des Stands der Forschung hinsichtlich der datenbasierten und modellbasierten Prognoseverfahren lässt sich bisher noch keine ausreichende Auswahl des anzuwendenden Verfahrens treffen. Zwar konnte festgestellt werden, dass die klassischen Verfahren der Zeitreihenanalyse nicht ausreichend sind, um die Prognose der Verkehrssicherheit durchzuführen. Weiterhin muss darauf geachtet werden, dass ein datenbasiertes Verfahren ebenfalls die notwendige Datenbasis zur Verfügung hat. Beide Verfahrensarten stellen die erforderliche Grundlage zur Wirkfeld-Prognose dar, auch wenn sich bisher keine konkrete Anwendung finden lässt. Gleiches gilt grundlegend für die Wirkungsanalysen. Zwar sind diese aktuell sehr Wirkfeld-spezifisch, prinzipiell lässt sich aber eine Erweiterung der Wirkungsanalysen auf die hier formulierte Fragestellung realisieren. In der Tabelle 4-3 findet sich eine Gegenüberstellung der Modellarten und Prognoseverfahren mit weiteren konkreten Beispielen aus dem Stand der Forschung und eine zusammenfassende Bewertung hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten im Rahmen dieser Arbeit.

Tabelle 4-3: Eignungsfähigkeit relevanter Modellarten und Prognoseverfahren, in Anlehnung an [Hughes et.al. 2015]

Modellart	Charakteristika	Anwendung	Vor- und Nachteile	Beispiele aus der Literatur	Auflösungsgrad	prognosefähig
Mathematische Modelle	Basieren auf quantitativer Analyse empirischer Daten und deren Beziehung zueinander.	Wird für die quantitative Analyse der Auswirkungen bestimmter Strategien verwendet	<ul style="list-style-type: none"> + hohe mathematische Kausalitäten + Relationen werden deutlich - zumeist sehr spezifischer Fokus - stark von Datengrundlage abhängig 	[Johnson 1980], [Loader u. Hobbs 1999], [Pun u. Hui 2002], [Hirasawa et.al. 2005], [Newman u. Watson 2011]	makroskopisch	ja
Interventions-Modelle	Identifizieren Maßnahmen und Gegenmaßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit (z. B. technische Maßnahmen, Verkehrsahndung, o. ä.)	Wird für Wirkanalysen von politischen Entscheidungen verwendet	<ul style="list-style-type: none"> + gute Input-Output-Analysen + Abbildung von Ressourcenabhängigkeiten - keine Beschreibung der Relationen 	[Rasmussen 1997]	mikroskopisch mesoskopisch	
Komponentenmodelle	Identifiziert alle Komponenten und Einheiten des Betrachtungsgegenstandes	Wird in der Sicherheitsstrategieentwicklung verwendet. Bietet eine Struktur für allgemeine Sicherheitsinformationen. Bietet allgemeine Beschreibungen	<ul style="list-style-type: none"> + Menschliche Fehler modellierbar + holistisch - keine Beschreibung der Relationen - keine Prozessabbildung 	[Gordon 1949], [Gibson 1961], [Haddon 1980], [Fell 1976], [Heinrich et.al. 1980], [Johnson 1980], [Booth 1980], [Poole 1986], [Grey et.al. 1987], [Embrey 1992], [McGraw et.al. 2008], [Burns u. Machado 2009]	mikroskopisch mesoskopisch	nein
Sequenzmodelle	Basieren auf Ereignis-Kettenmodellen zur Ermittlung der Unfallursachen	Wird für Unfallanalysen verwendet.	<ul style="list-style-type: none"> + Ereignisketten darstellbar + sehr gut für mikroskopische Analysen - keine komplexen Zusammenhänge - keine Kontextfaktoren 	[Haddon 1980], [Heinrich et.al. 1980], [Johnson 1980], [Cameron 1992]	mikroskopisch mesoskopisch	nein
Prozessmodelle	Identifizieren sequentielle Abläufe, bzw. Relationen von Maßnahmen zueinander	Wird verwendet zur Identifikation und Bewertung möglicher Risiken und Ursachen, um Gegenmaßnahmen zu entwickeln und zu bewerten	<ul style="list-style-type: none"> + ermöglichen ein gutes Verständnis für sequentielle Abläufe + Abbildbarkeit menschlichen Versagens - implizites Komponentenmodell - ungeeignet für komplexe Systeme 	[Blake 1963], [Heinrich et.al. 1980], [Rasmussen 1997], [Reason 2008], [Sauter et. al. 1990], [Childers u. Rohrer 1992], [Stang 1996]	mikroskopisch mesoskopisch	nein

<i>Modellart</i>	<i>Charakteristika</i>	<i>Anwendung</i>	<i>Vor- und Nachteile</i>	<i>Beispiele aus der Literatur</i>	<i>Auflösungs- grad</i>	<i>prognose- fähig</i>
<i>Sicherheitsmanagement Modelle</i>	Identifizieren Management Maßnahmen und Systeme, Relationen und generierte Prozessergebnisse	Wird in der Sicherheitsstrategieentwicklung verwendet. Bietet eine Struktur für allgemeine Sicherheitsinformationen. Bietet allgemeine Beschreibungen	<ul style="list-style-type: none"> + Abbildung der Sicherheitskultur + generische Betrachtungsweise - eingeschränkt in der Erkennung von Ursachen - setzt ein explizites SMS (Sicherheitsmanagement) voraus 	[Gibson 1961], [Blake 1963], [Glass et.al. 1979], [Heinrich et.al. 1980], [Johnson (1980), [Rasmussen 1982], [Childers u. Rohrer 1992], [Wegman et.al. 1995], [Weinstein 1996], [Glendon u. Waring 1997], [Redinger u. Levine 1998], [McGraw et. al. 2008], [Makin u. Winder 2008], [Burns u. Machado 2009], [Whitefield 2009], [Holló et.al. 2010], [Ball 2011], [Black et.al. 2011]	mesoskopisch makroskopisch	<i>nein</i>
<i>Systemtheoretische Modelle</i>	Beschreiben Ziele von Systemen, deren Komponenten und Relationen sowie die Abhängigkeiten untereinander	Wird verwendet zur Analyse von Systemen, einschließlich der Auswirkungen von Gegenmaßnahmen, Einflüssen und Konsequenzen	<ul style="list-style-type: none"> + Abbildung eines umfangreichen Systemverständnisses + Integrierbarkeit unterschiedlicher Systemkomponenten (Menschen, Technik, Software, etc.) - Neigung zu hoher Modellkomplexität - Eingeschränkte Abbildung aller möglichen Auswirkungen 	[Johnson 1980], [Stang 1996], [Porter u. Wettig 1999], [Leveson 2004], [Burns u. Machado 2009], [Whitefield 2009], [Larson et. al. 2010], [Salmon et.al. 2012], [Goh et. al. 2012], [Read et.al. 2013]	mesoskopisch makroskopisch	<i>ja</i>

5 Modellkonzepte zur Verkehrssicherheitsprognose

“The search for scientific bases for confronting problems of social policy is bound to fail, because ... [they] are ‘wicked’ problems...”

(Rettel u. Webber)

Je nach gewähltem Modellkonzept ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse in der Systembetrachtung mit z. T. signifikanten qualitativen Unterschieden [Salmon u. Lenné 2009] [Delorme u. Lassarre 2014]. Je evolvierter das Modellkonzept ist, desto plausibler kann ein System abgebildet und prognostiziert werden [Leveson 2011]. Mit dem Ziel ein geeignetes Modellkonzept für die Prognose der Verkehrssicherheit zu identifizieren, werden im Folgenden unterschiedliche Modellkonzepte zur Systemrepräsentation vorgestellt. Zuerst wird auf die grundlegenden systemtheoretischen Modellkonzepte eingegangen (siehe Abschnitt 5.1). Nachdem auf die Modellkonzepte der unterschiedlichen Systemtheorien eingegangen worden ist, werden dedizierte Sicherheitsmodellkonzepte betrachtet (siehe Abschnitt 5.2). Anschließend wird auf die sog. regelungstechnischen und systemdynamischen Modellkonzepte eingegangen, welche im Kontext der Verkehrssicherheit zur Systemmodellierung angewendet werden (siehe Abschnitt 5.3).

5.1 Systemtheoretische Modellkonzepte

Um zuerst eine geeignete definitorische Eingrenzung des Begriffs der Systemtheorie herzuleiten, ist es erforderlich zu betrachten, welche Art der Systemtheorien für verkehrliche Fragestellungen anwendbar sind. Eine zusammenfassende Definition des Systembegriffs wird durch das Systemaxiomprinzip nach [Schnieder 1999] erreicht. Eine Definition des Systembegriffs wird in Form von vier Axiomen vorgenommen. Diese ergänzen sich gegenseitig und repräsentieren die grundlegenden Eigenschaften eines jeden Systems. Die Systemaxiome nach [Schnieder 1993] umfassen die folgenden Prinzipien:

- *Strukturprinzip*

Ein System muss aus einer mathematischen, definierbaren Menge von Teilen bestehen, welche untereinander und mit ihrer Systemumgebung eine wechselseitige Beziehung aufweisen. Der jeweilige Systemzustand definiert sich durch die aktuellen Werte der Systemgrößen. Ein System muss zwecks seiner Abgrenzung von der Umgebung eigenständig und widerstandsfähig sein [Schnieder 1993]. Die Systemstruktur bestimmt also die Wirkungsweise des Systems und dessen Daseinszweck [Jackson 2003].

- *Dekompositionsprinzip*

Die Systemelemente können in Unterteile zerlegt werden, sogenannte Teilsysteme. Innerhalb dieser Unterteile bestehen wiederum wechselseitige Beziehungen zwischen den Unterteil-elementen. Die Unterteile des Systems erfüllen ebenfalls die Systemeigenschaften [Schnieder 1993].

- *Kausalprinzip*

Die Veränderungen der Systemelemente sind aufgrund ihres kausalen Wirkzusammenhangs eindeutig determiniert. „Kausalität wird als Logik von Abläufen verstanden“ (nach [Schnieder 1993]). Demnach können aufgrund der Kausalität vorangegangene Systemzustände antizipiert werden.

- *Temporalprinzip*

Ein System unterliegt einer zeitlichen Dynamik, durch welche die Systemelemente beeinflusst werden. Temporalität wird hier als zeitliche Folge von Abläufen verstanden. Dieses Axiom berücksichtigt auch die Gesetze der Kausalität, wonach vorhergehende oder nachfolgende Zustände aufgrund des aktuellen Systemzustands berechnet werden können [Schnieder 1993].

Die Systemaxiome liefern eine ausreichende Eingrenzung des Systembegriffs. Im Folgenden werden nun verschiedene Systemtheorien und eine Eingrenzung anwendbarer systemtheoretischer Konzepte für verkehrssicherheitliche Fragestellungen eröffnet: [Bertalanffy 1984] gilt als Mitbegründer der Systemtheorie und definiert fünf Ziele des grundlegenden Verständnisses über Systemtheorien:

- Systemtheoretische Ansätze unterstützen die zunehmende Integration unterschiedlicher Fachdisziplinen
- Systemtheoretische Ansätze streben die Schaffung einer exakten Wissenschaft und Theorie außerhalb der Physik an
- Systemtheoretische Ansätze streben die Entwicklung einer einheitlichen Wissenschaft und eines einheitlichen, systemtheoretischen Weltbilds an
- Systemtheoretische Ansätze vereinfachen und abstrahieren wissenschaftliche Erklärungsmodelle
- Systemtheoretische Ansätze unterstützen die wissenschaftliche Ausbildung und schaffen wissenschaftliche Generalisten [Bertalanffy 1984]

Im Folgenden findet ein Abriss relevanter Systemtheorien unterschiedlicher Fachdisziplinen statt. Hierbei werden relevante Aspekte der unterschiedlichen Fachdisziplinen für das Verkehrssystem identifiziert. Diese Aspekte sind wiederum relevant, um eine Eingrenzung einer anwendbaren Systemtheorie für verkehrliche Fragestellungen vorzunehmen.

5.1.1 Biologische Systemtheorie

[Bertalanffy 1973] prägte erstmals Ende der 1960er Jahre den Begriff der Systemtheorie. Mit seinem Hintergrund aus der Biologie definierte er allgemeine Prinzipien, nach denen sich interagierende Systeme definieren lassen. Demnach zeichnen sich interagierende Systeme dadurch aus, dass sie eine gegenseitige Abgrenzung aufweisen, auf die Realisierung einer speziellen Funktion mechanisiert sind, sich selbst um ein führendes System zentralisieren und selbst eine organisierte Einheit aus Individuen sind, die nur als Einheit überlebensfähig sind. Vergleichbare

Annahmen über Systeme stellte bereits Darwin im Rahmen seiner Evolutionstheorie auf. Wo hingegen Darwin noch seine Prinzipien der Transformation und Diversifikation, die sich als Mutation, Rekombination, Selektion und Vererbung ausprägen, auf die Entstehung von Arten reduzierte, erweitert [Bertalanffy 1973] sein Verständnis dahingehend, dass sich ähnliche Prinzipien auf eine sich bildende Umwelt übertragen lassen. [Bertalanffy 1973] prägte hier den Begriff der *systemtheoretischen Evolutionstheorie*.

Aus den Arbeiten von [Bertalanffy 1973] ergab sich später die *sogenannte synergetische Systemtheorie*. Hierbei ergänzten [Maturana et.al. 1990] die Prinzipien von [Bertalanffy 1973] mit dem Konzept Leben und Erkenntnis. Demnach entsteht aus Leben mit einer Wahrnehmung wiederum eine Struktur, Organisation und dadurch sog. Strukturdeterminiertheiten von biologischen Systemen. [Pulm 2004] fasst das Konzept der synergetischen Systemtheorie dahingehend zusammen, dass „*Wahrnehmung und Handlung [...] eine Einheit der ständigen Anpassung des Systems an die Umwelt [sind] und im Wesentlichen von der inneren Struktur des Systems abhäng[en]*.“ [Pulm 2004].

Aufgrund der Übertragung der evolutionstheoretischen Prinzipien auf ein allgemein systemisches Verständnis fanden die Konzepte der biologischen Systemtheorie Einzug in weitere Fachdisziplinen und üben damit einen Einfluss auf die systemtheoretischen Annahmen für das Verkehrssystem aus.

5.1.2 Soziologische Systemtheorie

Ursprünge der soziologischen Systemtheorie finden sich in den Arbeiten von [Durkheim u. Luhmann 1988] und [Smith 2005]. Dabei haben sie den Begriff der sozialen Arbeitsteilung durch Anwendung systemtheoretischer Konzepte geprägt. Sie sind zu der Annahme gekommen, dass die Leistungsfähigkeit sozialer Systeme durch funktionelle Differenzierung erhöht werden kann. Die Komplexität sozialer Systeme weist ebenso eine Bedeutung auf dessen funktionale Leistungsfähigkeit auf. Der Komplexitätsbegriff definiert sich hierbei, indem jedes soziale Systemelement mit einem anderen direkt verbunden ist. Die Weiterentwicklung der sozialen Systemtheorie stellt die strukturell-funktionale Systemtheorie nach [Brock et.al. 2007] dar: Demnach erzeugen gesellschaftlich geschaffene Strukturen selbst Funktionen, die den Erhalt dieser Strukturierung sichern sollen. Dabei besitzen die sozialen Systeme die Eigenschaft einer gewissen Widerstandsfähigkeit gegenüber ihrer Umgebung und können sich adaptiv an diese anpassen [Miller 1987], [Buckely 1968] und auf [Parsons 1969].

Das Verkehrssystem vereint eine Reihe unterschiedlicher Systemkomponenten, wie bereits die Unterteilung der am Verkehr beteiligten Akteure durch das Prinzip der Verkehrskonstituenten (vgl. Abschnitt 2.1) verdeutlicht. Folglich haben die Aspekte der soziologischen Systemtheorie ebenfalls einen Einfluss auf die systemtheoretischen Prinzipien des Verkehrssystems.

5.1.3 Psychologische Systemtheorie

Die Fachdisziplin der Psychologie hat ebenfalls ihre eigenen systemtheoretischen Konzepte hervorgebracht. Die psychologische Systemtheorie umfasst denkpsychologische Aspekte, physische Entwicklungen, therapeutische Maßnahmen sowie Persönlichkeitstypen. Dörner nutzte diese Konzepte in seinen Arbeiten, um das Thema des individuellen Komplexitätsumgangs zu untersuchen. Demnach ist der Umgang mit komplexen Situationen von folgenden Eigenschaften abhängig:

- Begrenztheit des Kurzzeitgedächtnisses
- Handeln ohne Analyse
- Nichtberücksichtigen von Fern- und Nebenwirkungen
- Nichtberücksichtigen der Ablaufgestalt von Prozessen
- „Methodismus“
- lineares Denken
- mangelnde Einsicht in Zielkonflikte
- Lösung falscher und Nichtberücksichtigen impliziter Probleme

Anhand der von [Dörner 2009] definierten Eigenschaften zur Komplexitätsbewältigung kann man bereits erste Vermischungen unterschiedlicher Systemtheorien erkennen [Weth et.al. 2002]. Die psychologische Systemtheorie versucht weiterhin allgemeingültige Eigenschaften von individuellen Systemen zu erkennen. So werden z. B. in der kognitiven Entwicklung drei grundlegende Mechanismen erkannt:

1. *Assimilation und Anpassung*: Hierunter wird die Nachahmung eines Individuums bestimmter Verhaltenspläne verstanden.
2. *Differenzierung von der Umwelt*: Hierunter wird die Entwicklung differenzierter interner Prozesse zur Bildung einer Kognition verstanden.
3. *Identität und Autonomie*: Hierunter werden die Reflexion des Denkens und das Setzen eigener Ziele als Funktion zur kognitiven Entwicklung angesehen [Piaget 1992].

Da weiterhin der menschliche Fahrer als Teil des Verkehrssystems einzustufen ist, spielen dementsprechend auch Aspekte der psychologischen Systemtheorie eine Rolle bei der Eingrenzung relevanter Prinzipien der Systemtheorie für verkehrliche Fragestellungen.

5.1.4 Ingenieurs- und wirtschaftswissenschaftliche Systemtheorie

Die ingenieurs- und wirtschaftswissenschaftliche Systemtheorie befasst sich mit systemtheoretischen Prinzipien künstlich, bzw. menschlich-geschaffener Systeme. Grundsätzlich lässt sich dieser Typ der Systemtheorie in drei Arten einteilen:

- *der harte Ansatz*: Dieser Ansatz befasst sich mit eindeutig physikalisch beschreibbaren, technischen Systemen und weist einen hohen Grad an Determinismus auf.
- *der allgemeine Ansatz*: Dieser Ansatz dient in erster Linie der Entwicklung komplexer soziotechnischer Systeme, bei denen gezielt eine Vielzahl verschiedenartiger Systemkomponenten dahingehend miteinander kombiniert werden sollen, dass das System einen bestimmten Zweck erfüllt.
- *der weiche Ansatz*: Dieser Ansatz beschreibt das Management und die Organisation soziokultureller Systeme und beinhaltet weniger technische Aspekte.

Alle drei Ansätze bauen aufeinander auf, haben sich jedoch parallel selbstständig weiterentwickelt. Für die Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme mit einem hohen soziotechnischen Charakter setzt sich aktuell der allgemeine Ansatz der ingenieurwissenschaftlichen Systemtheorie durch, vgl. [Leveson 2011], [Hollnagel 2006], [Mohaghegh u. Mosleh 2009]. Die grundsätzliche Motivation hinter ingenieurs- und wirtschaftswissenschaftlichen Systemtheorien liegt in der strategischen Planung und Entwicklung großer Systeme [Wiener 1948] [Goode u. Machol 1957] [Ropohl 1973]. Die zugrundeliegende methodische Vorgehensweise fokussiert dabei die Modellbildung und Simulation und unterscheidet zwischen der Erstellung und dem Betrieb des

Systems [Chestnut 1973]. Ein Fokus wird dabei zunehmend auf die Flüsse im System gelegt [Forrester 1968] [Pulm 2004].

Das sich aus dieser Systemtheorie ergebende Systemdenken beinhaltet demnach ein gewisses Verständnis von künstlichen Systemen. Künstlich/menschlich geschaffene Systeme lassen

- sich in ihre Elemente und Relationen zerlegen,
- ihre Systemgrenzen können gebildet und verschoben werden,
- die Systeme weisen mind. einen Input und Output auf,
- sie weisen eine Systemhierarchie auf und
- sie erlauben unterschiedliche Sichten auf das System.

Da sich das Verkehrssystem als menschlich-geschaffenes System darstellt (vgl. Abschnitt 4.6), lassen sich die soeben benannten Eigenschaften und Prinzipien auf das Verkehrssystem übertragen. Die ingenieurs- und wirtschaftswissenschaftlich geprägte Systemtheorie ist die naheliegende Ausprägung der verfügbaren Systemtheorien für die in dieser Arbeit formulierte Fragestellung deren Ausprägung in Form regelungstechnischer und systemdynamischer Modellkonzepte in Abschnitt 5.3 speziell behandelt wird. Im Folgenden wird auf die konkreten Sicherheitsmodellkonzepte eingegangen.

5.2 Sicherheitsmodellkonzepte

Für die Betrachtung der potentiell relevanten Sicherheitsmodellkonzepte muss zunächst eine Definition der Begrifflichkeit „Sicherheit“ erfolgen: Allgemein versteht man unter Sicherheit die Abwesenheit von unerwünschten Ereignissen. Die Sicherheit eines Systems zeigt sich erst durch das Zusammenspiel aller Systemkomponenten [Schnieder u. Schnieder 2013] [Leveson 2011]. Daher kann Sicherheit als emergente Systemeigenschaft bezeichnet werden. Emergente Systemeigenschaften lassen sich wiederum nicht mehr einzelnen Systemkomponenten oder Subsysteme zuordnen [Larsson et.al. 2010]. Um folglich Sicherheit in einem System herbeizuführen, geht man analytisch vor, um potentielle Unsicherheiten durch das Zusammenspiel der Systemkomponenten zu identifizieren.

Unter einem Sicherheitsmodellkonzept ist ein theoretisches Paradigma zu verstehen, dass erklärt, wie Sicherheit in einem System entsteht, bzw. worin die Kausalität für Unsicherheiten begründet liegt. Im Laufe der Zeit haben sich eine Reihe von verschiedenen Sicherheitsmodellkonzepten (engl. auch Accident Models, vgl. hierzu [Leveson 2011]) entwickelt. Ihren Ursprung finden die Sicherheitsparadigmen in sog. Ereignisuntersuchungen. Diese zielen darauf ab, Ursachen für das Auftreten von Ereignissen zu ermitteln, um Korrekturmaßnahmen zur Verbesserung des Sicherheitsniveaus des Systems zu definieren und umzusetzen. Im Rahmen des Sicherheitsmanagements ist die Ereignisermittlungsmethodik eng mit der Berücksichtigung sicherheitsrelevanter Aspekte verknüpft. [Reason 1990] beschrieb drei zeitliche Perioden mit dem Schwerpunkt Sicherheit. [Büttner et.al. 2007] fügten einen vierten hinzu:

1. *Technische Periode*: Ursache der unerwünschten Ereignisse ist rein technisch bedingt.
2. *„Menschlicher Fehler“-Periode*: Ursache der unerwünschten Ereignisse ist / sind die Person(en).
3. *Soziotechnische Periode*: Ursache der unerwünschten Ereignisse ist die Interaktion zwischen sozialen und technischen Subsystemen.

4. *Inter-organisatorische Beziehungsperiode*: Ursache der unerwünschten Ereignisse ist eine dysfunktionale Beziehung zwischen Organisationen [Dien et.al. 2012].

Die zeitlichen Perioden sind primär von der Art und dem Entwicklungsgrad der Systeme abhängig. Während die technische Periode, wie auch die „Menschliche-Fehler“-Periode noch Ereignisermittlungen relativ einfacher Systeme (zumeist rein mechanisch) betrieben haben, befassen sich die Methoden der soziotechnischen Periode verstärkt mit Systemen, die neben mechanischen Komponenten auch Software- und Hardwarekomponenten nutzen. Diese Systeme sind stark vom Einsatz menschlicher Ressourcen abhängig. Unabhängig von der zu betrachtenden Systemart ist die Durchsetzungskraft der Paradigmen stark vom Nutzen der daraus resultierenden Annahmen zur Beherrschung der Sicherheit abhängig: Je präziser ein Modellkonzept den Betrachtungsgegenstand der Sicherheit erfasst, desto mehr Anerkennung wird es in der praktischen Anwendung finden und gleichzeitig geeigneter für die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit sein.

Im Folgenden wird nun kurz auf vier verbreitete Sicherheitsmodellkonzepte aus den ersten drei Perioden eingegangen (siehe Abschnitte 5.2.1 bis 5.2.4). Die Inter-organisatorische Beziehungsperiode gilt noch als schwach erarbeitet und wird daher hier nicht weiter betrachtet [Schnieder 2007].

5.2.1 DominoModellkonzept

Das von [Heinrich 1931] vorgestellte Domino-Modell wurde im Rahmen von Studienarbeiten zum Arbeitsschutz von Versicherungen in den 1930er Jahren entwickelt. Das Modell beinhaltete zu Zeiten der *Technischen Periode* bereits kausale Faktoren, die einerseits menschliche Fehler berücksichtigen und andererseits mechanisch-physikalische Bedingungen in die Unfallursachenermittlung einbezogen.

Das Domino-Modell von [Heinrich 1931] erarbeitet die Unfallursachen im Rahmen eines sequentiell aufgebauten Unfallmodells in Form einer Ereigniskette. Die Namensgebung kommt von der Analogie, dass ein initiales Ereignis ein kausal folgendes Ereignis verursacht, und so weiter. Am Ende der Kette tritt der Unfall auf. Heinrich definierte bereits die menschliche Verletzung als letztes Glied der Kette, eine Sichtweise, die heute immer Anwendung findet (die menschliche Verletzung ist immer noch das Ereignis, welches letztlich verhindert werden soll). Heinrich stellte die Theorie auf, dass, sobald ein Domino-Stein in der Kette, also ein Ereignis, aufgehalten wird, die Kette nicht durchlaufen wird und die Verletzung verhindert werden kann.

Das Domino-Modell erfuhr diverse Erweiterungen, so inkludierte [Bird u. Germain 1966] neben dem menschlichen Schaden ebenfalls finanzielle und materielle Verluste als letzte Kettenglieder. In Zeiten der technischen Periode war das Modell simpel genug, um effizient Lösungen für arbeitstechnische Unfälle zu generieren. Als problematisch ist eher anzusehen, dass das Modellkonzept dazu geführt hat, dass weniger die Ursachenfrage gestellt wurde, sondern vielmehr die Ereigniskette dazu genutzt wurde einen Schuldigen zu identifizieren. Das beseitigte zwar das Unfall-Symptom, nicht aber dessen Ursache. Mit steigender Systemkomplexität ist das Sicherheitsparadigma von Heinrich nicht mehr nutzbar [Leveson 2011].

5.2.2 Swiss-Cheese-Modellkonzept

Das vom britischen Psychologen [Reason 1990] entwickelte Schweizer-Käse-Modell (Swiss Cheese-Modell) erklärt den Unfall als Ergebnis von latenten und aktiven menschlichen Fehlern,

welche im Rahmen von Ereignisketten zu einem Unfall führen. Das Swiss Cheese-Modell kann der Periode der menschlichen Fehler zugeordnet werden.

Das Modell beschreibt unvollkommen hintereinanderliegende Sicherheitsebenen (symbolisiert durch Schweizer-Käse-Scheiben), durch deren Löcher sich aktive und latente Fehler im Zeitverlauf zu Unfallereignissen entwickeln. Dabei hat [Reason 1990] das Verständnis, dass die Löcher sich in ihrer Größe (Schweregrad des Fehlers) und Lage (auslösende Faktoren) im Zeitverlauf verändern können und damit eine gewisse Dynamik im System aufweisen. [Reason(s) 1990] zentrale These basiert auf der Annahme, dass Unfälle sich letztlich auf ein initiales Ereignis zurückführen lassen. Diese Ereignisse können lange vor Eintritt des eigentlichen Unfallereignisses aufgetreten sein und werden daher als latente Fehler bezeichnet. In Kombination mit einem aktiven Fehler (konkret: dem aktiven Versagen einer Person) wird die letzte Hürde der Sicherheitsebene von dem latenten Ereignis genommen und der Unfall tritt ein.

Das Modell findet noch heute breite Anerkennung und das zugrundeliegende Sicherheitsparadigma findet für eine Vielzahl von Unfallereignissen seine Gültigkeit. Methodisch basieren z. B. Fehlerbaumanalysen auf dem [Reason 1990]-Modell und stellen eine Instanziierung des Sicherheitsparadigmas dar. So wurde z. B. durch das Schweizer-Käse-Modell das Konzept der „Critical Incident Reporting Systems“ geprägt, diese Meldesysteme generieren ein gewisses Bewusstsein über Löcher in den Sicherheitsschichten und beabsichtigen die Ereignisketten zu unterbrechen. Das Sicherheitsparadigma von [Reason 1990] erhält seine größte Kritik in seiner Anwendbarkeit für komplexere soziotechnische Systeme. Die Fokussierung des Ansatzes auf symptomatische Effekte, anstatt ursächliche Fragestellungen zu adressieren, wird aktuell als größter Nachteil angesehen. Anstatt die Kontextfaktoren zu eruieren, die einen latenten oder aktiven Fehler ermöglichen, liegt das Augenmerk auf der Identifikation von Maßnahmen zur Unterbrechung der Ereigniskette [Leveson 2011].

5.2.3 STAMP-Modellkonzept

In die dritte Periode, die soziotechnische Periode, lässt sich das STAMP-Modell (Systems-theoretic Accident Model and Processes) von [Leveson 2011] einordnen: Das Anfang der Jahrtausendwende vorgestellte STAMP-Modell definiert die Ursache von Unfällen durch die Überschreitung der sicheren Systemverhaltensgrenzen. Dabei legt [Leveson 2011] dem Sicherheitsparadigma ein kybernetisches Verständnis zugrunde: Das System muss mindestens einen gewissen Grad an Steuer-, bzw. Regelbarkeit aufweisen. Wechselwirkungen zwischen technischen und menschlich/organisatorischen Systemkomponenten verursachen letztlich dysfunktionale Kopplungen und ein Überschreiten der sicheren Verhaltensgrenzen des Systems. Systemsicherheit wird erreicht, indem dysfunktionale Kopplungen zwischen Systemkomponenten gezielt unterbunden werden.

„[STAMP] is a new approach to hazard analysis that enables model-based simulation and analysis of risk throughout the system life cycle, including complex human decision-making, software errors, system accidents (versus component failure accidents), and organizational risk factors.“ (nach [Leveson 2011])

Das STAMP-Modell sieht ein stark ursachenorientiertes Vorgehen bei der Analyse von möglichen Gefährdungen, bzw. Unfallursachen vor [Leveson 2011] [Ouyang et al. 2010] [Vieweg 2010]. Dabei wird bewusst auf ein ereigniskettenbasiertes Verständnis der Unfallursachenanalyse verzichtet. Das STAMP-Modell sieht eine qualitative Abbildung des Systems in sog. hierarchischen

Regelungsstrukturen vor. Verschiedene nach dem STAMP-Modell definierte Methoden nutzen das Sicherheitsparadigma, zu diesen Methoden gehören:

- STPA (Systems-Theoretic Process Analysis): Die STPA stellt die klassische Gefährdungsanalyse dar (das Risiko wird nicht ermittelt). Hierbei wird ein System auf seine möglichen Gefährdungen hin untersucht. Das mehrstufige Verfahren sieht letztlich eine Ursachenanalyse vor, warum ein unsicheres Systemverhalten überhaupt erst eintreten kann.
- STECA (STAMP based Early Concept Analysis): Die STECA avisiert eine Gefährdungsanalyse zu einem sehr frühen konzeptionellen Stand der Systementwicklung. Die Analyse geht davon aus, dass erst sehr wenige Anforderungen an das und konkrete Ausprägungen des System(s) bekannt sind und sieht daher ein holistisches Vorgehen vor.
- CAST (Causal Analysis based on STAMP): Die CAST repräsentiert eine Unfallanalyse. Hier wird davon ausgegangen, dass ein Unfallereignis aufgetreten ist und versucht wird bestmöglich aus dem vergangenen Ereignis zu lernen.

[Leveson 2011] beansprucht dabei, ein domänenunabhängiges Sicherheitsparadigma zu entwickeln und einen Methodenbaukasten bereitzustellen, der in verschiedenen sicherheitsrelevanten Industrien angewendet werden kann. So wurde STAMP bereits erfolgreich in einer Reihe unterschiedlicher Systeme angewendet und findet auch im Rahmen der zunehmenden Fahrzeugautomatisierung in Normungsvorhaben (z. B. ISO/PRF PAS 21448 zur Safety of the intended functionality, vgl. Abschnitt 2.4) bereits seine Anerkennung.

Das STAMP-Modell sieht Sicherheit als regelungstechnisches Problem, unabhängig davon, ob es sich dabei um ein rein technisches oder soziales System handelt. Es kann also auch davon ausgegangen werden, dass STAMP durchaus Anerkennung für die vierte Periode, der inter-organisatorischen Periode, finden wird. Da sich das Straßenverkehrssystem als komplexes sozio-technisches System klassifizieren lässt und gleichzeitig einen gewissen Grad an Steuerbarkeit aufweist, wird das Modellkonzept vom STAMP-Ansatz als geeignetstes Konzept zur Erklärung der Verkehrssicherheit genutzt.

5.2.4 Modellkonzept der Unfallforschung

Die Verkehrsunfallforschung stellt sich folgende Zielsetzung:

„Im Bereich der Verkehrssicherheit zielt die Unfallforschung auf Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen und auf Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen. Unfallursachen im Regelkreis Mensch-Fahrzeug-Umfeld sind ebenso wie Zusammenhänge zwischen technischer Ausführung und Unfallfolgen, [sic!] zwischen konstruktiver Gestaltung von Fahrzeugen und Verletzungsfolgen zu identifizieren.“ [Appel et. al. 2005]

Das Modellkonzept der Unfallforschung sieht dabei eine Betrachtung des Unfallgeschehens auf Basis empirischer Daten vor. Die Verkehrsunfallforschung wählt dabei mikro- bis mesoskopische Perspektiven auf das Verkehrsgeschehen (vgl. Stufe C und B in Abbildung 5-1):

- Die *mikroskopische Perspektive* betrachtet hierbei das fahrzeuginterne Geschehen bei einem Verkehrsunfall, dazu zählt u. a. auch die Bestimmung von Verletzungsschweren, quantisiert durch die AIS (Abbreviated Injury Scale).
- Die *mesoskopische Perspektive* betrachtet das Unfallgeschehen in der Perspektive zwischen den Fahrzeugen. Hier kann direkt die Topologie des Straßennetzes mit allen Verkehrsmitteln und Verkehrsobjekten abgebildet werden [Appel et. al. 2005].

- Die *makroskopische⁴ Perspektive* wird aktuell zumeist durch die Verkehrsunfallstatistiken abgebildet. Innerhalb dieser Perspektive wird der Output des Verkehrssystems analysiert (z. B. Unfallaufkommen auf bestimmten Straßentypen). Die hierbei verwendeten Modellkonzepte bei einer Modellierung sind dabei meist agentenbasiert oder diskret.

Das zugrundeliegende Modellkonzept der Unfallforschung folgt zumeist der mathematischen Form

$$E(\gamma_i, x_i) = a Q_{MA}^{\beta} Q_{MI}^{\beta} e^{\sum \gamma_i x_i} \quad (1.1)$$

mit

$E(\gamma_i, x_i)$	Unfallaufkommen
Q	Verkehrsvolumen
β	Elastizitätsexponent
x_i	Risikofaktor
γ_i	Wichtungsfaktor

Hierbei wird das prognostizierte Unfallaufkommen $E(\lambda)$ als Funktion vom Verkehrsvolumen Q unterschiedlicher am Verkehr beteiligter Verkehrsobjekte und -mittel (hier ausgedrückt durch die Indizes MA und MI) und verschiedene Risikofaktoren x_i ($i=1, 2, \dots, n$) dargestellt. Der Einfluss vom Verkehrsvolumen auf das Unfallaufkommen wird hierbei als Elastizität in Abhängigkeit vom Exponenten β bestimmt. Die Wichtungsfaktoren γ_i verschiedener Risikofaktoren x_i werden als Exponent zur Basis e mittels der Summe der Koeffizienten γ_i gebildet [Eenik, et.al. 2005].

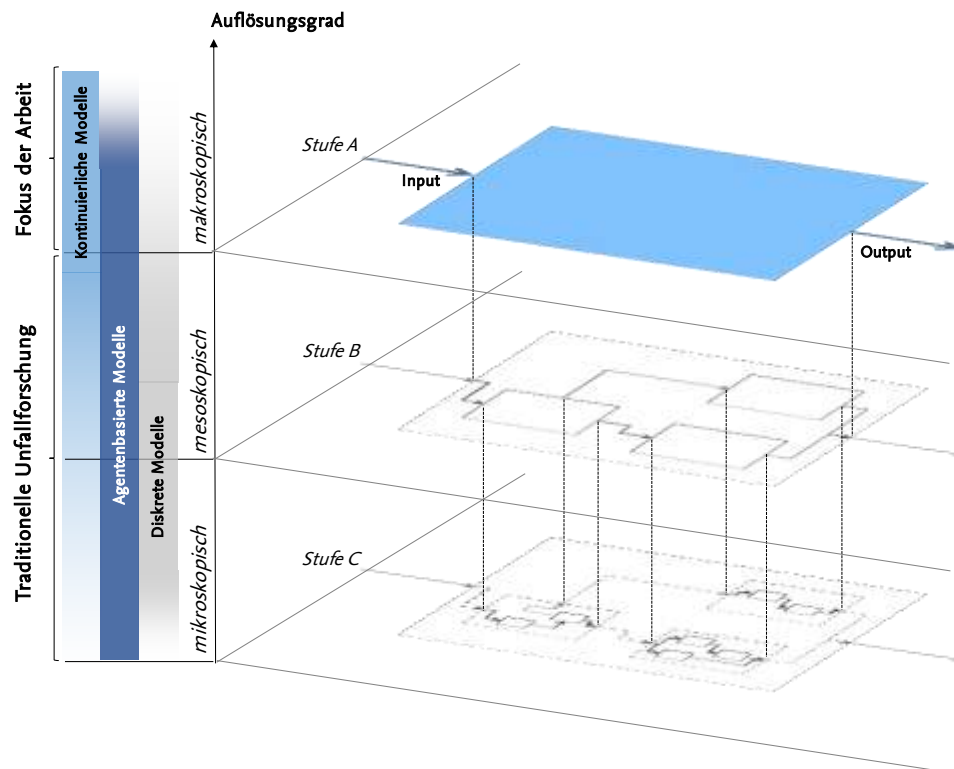


Abbildung 5-1: Klassisches Modellkonzept der Unfallforschung, in Anlehnung an [Daenzer 1988] und [Grigoryev 2015]

⁴ Makroskopische Modelle werden auch in der Unfallforschung als aggregierte Modelle bezeichnet, vgl. [Appel 2005].

Je nach Variation der Einflussfaktoren bestimmter Maßnahmen lässt sich somit das Verkehrsunfallaufkommen, bzw. die Verkehrsunsicherheit, mittels des mathematischen Modells prognostizieren.

Neben dem Einsatz aggregierter/makroskopischer Modelle zur Prognose des Unfallaufkommens findet die Verkehrssimulation zahlreiche Anwendungsbeispiele. Dabei liegt der Fokus der Verkehrssimulationen zumeist auf der Wirkungsanalyse ausgewählter Maßnahmen in einer Fahrzeug-Fahrer-Fahrumgebung-Perspektive (vgl. Abschnitt 4.5). Die Parametrierung der Modelle wird möglichst realitätsnah durch sog. in-depth Unfalldatenbanken, wie GIDAS (German in depth Accident Study), unterstützt [Wille et.al. 2012]. Nachdem auf die relevanten Sicherheitsmodellkonzepte eingegangen worden ist, werden im Folgenden die regelungstechnischen und systemdynamischen Modellkonzepte betrachtet.

5.3 Regelungstechnische und systemdynamische Modellkonzepte

Im Hinblick auf die näher definierte Systemauflösung aus dem vorhergehenden Abschnitt 5.2.4, werden die regelungstechnischen und systemdynamischen Modellkonzepte nach dem Systemauflösungsgrad differenziert betrachtet. Der Abschnitt 5.3.1 betrachtet die mikro- bis mesoskopischen Modellkonzepte und der daran sich anschließende Abschnitt 5.3.2 stellt ein makroskopisches Modellkonzept vor. Die sich anschließenden Abschnitte beleuchten die aggregierten stochastischen (siehe Abschnitt 5.3.3) und aggregierten regelungstechnischen Modellkonzepte (siehe Abschnitt 5.3.4) sowie die kybernetischen Modellkonzepte (siehe Abschnitt 5.3.5).

5.3.1 Mikro- bis mesoskopische Modellkonzepte

In mikroskopischer bis mesoskopischer Betrachtung des Verkehrsprozesses lassen sich für die Fahrzeugführung drei Systembestandteile unterscheiden: Fahrer, Fahrzeug und Umgebung. Der Fahrer agiert als Regler mit seiner individuellen Regelbasis über das Lenkrad und die Pedale und regelt so das Fahrzeug als die zu regelnde Strecke [Leveson 2011]. Das Fahrzeug wirkt wiederum auf die Umwelt, aus welcher der Fahrer mittels seiner verfügbaren Sinnesorgane Informationen wahrnimmt. Darüber hinaus erhält der Fahrer direkt Informationen vom Fahrzeug. Somit ergibt sich aus der Betrachtung der Fahrzeugführungsaufgabe die Sollgröße der zu erbringenden Regelung [Abendroth u. Bruder 2012]. Neben der fahrerseitigen Fahrzeugführung muss auch die Fahrzeugführung durch das Fahrzeug selbst, also die FAS, in der Darstellung der mikroskopischen regelungstechnischen Aufgabe betrachtet werden. Die Automatisierungsfunktion als Teil des Fahrzeugs kann also anteilig einzelne Sollgrößenregelungen vom Fahrer nehmen [Maurer et.al. 2015].

Die Fahrzeugführungsaufgabe wird allgemein in drei Ebenen aufgeteilt:

- Navigationsebene (Bestimmung der Fahrtroute)
- Führungsebene (Auswahl der Spur und Geschwindigkeit)
- Stabilisierungsebene (Anpassung der Bewegung des Fahrzeugs an die gewählten Sollgrößen) [Gründl 2005] [Abendroth u. Bruder 2012]

Diese Einteilung ist vergleichbar mit der von Rasmussen etablierten Einteilung von Arbeitsaufgaben hinsichtlich der kognitiven Anforderungen an den Menschen [Donges 2012]. Das Rasmussen-Konzept unterteilt menschliches Verhalten auch in drei Ebenen:

- *Wissensbasiertes Verhalten* (knowledge-based behavior): bewusst gesteuerte, auf analytischen Prozeduren beruhende Verhaltensweisen
- *Regelbasiertes Verhalten* (rule-based behavior): Anwendung gelernter Regeln, z. B. Wenn-Dann-Regeln
- *Fähigkeitsbasiertes Verhalten* (skill-based behavior): hochgeübte Verhaltensweisen, Routinehandlungen, die automatisiert ohne bewusste Aufmerksamkeit oder Kontrolle ablaufen [Rasmussen 1997]

Die Abbildung 5-2 zeigt einen vereinfachten Regelkreis der mikroskopischen bis mesoskopischen Fahrzeugführung. Hierunter lassen sich relativ einfach die Maßnahmen der verschiedenen Ressourcen verorten und direkt im mesoskopischen Verkehrsgeschehen abbilden. Im Hinblick auf die Induzierbarkeit von Verkehrssicherheitsmaßnahmen auf das Gesamtsystemverhalten gewinnt die makroskopische Regelungsaufgabe an Bedeutung. Dies wird im Folgenden näher erläutert.

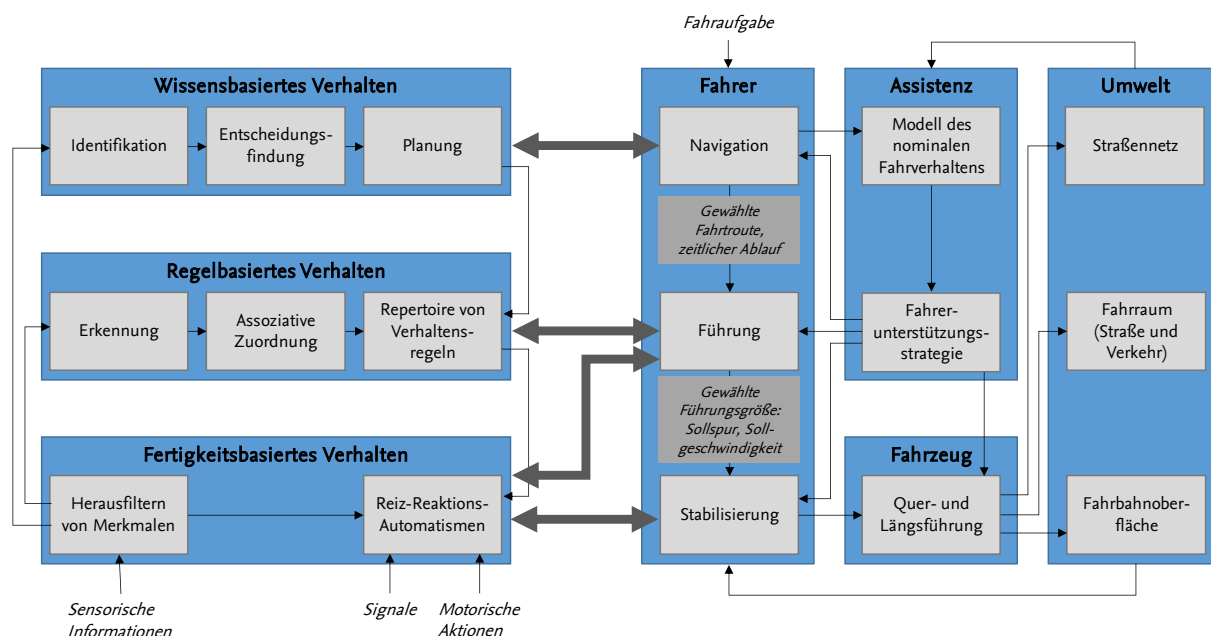
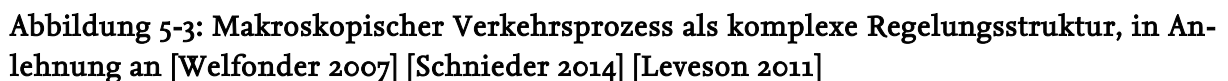


Abbildung 5-2: Mikroskopischer Verkehrsprozess im Drei-Ebenen-Modell als Regelungsstruktur, in Anlehnung an [Rasmussen 1997] [Rasmussen 1997] [Wiltshko 2004]

5.3.2 Makroskopische Modellkonzepte

In einer makroskopischen Perspektive auf die regelungstechnischen Modellkonzepte der Verkehrssicherheit stellt sich das Verkehrssystem als komplex-kaskadiertes Mehrgrößenregelsystem dar. Das System bildet demnach mehrere hierarchische Ebenen ab, die zwischen kurzfristigen und längerfristigen sowie räumlich getrennten Regelgrößen unterscheidet. Der Gesamtverkehr und damit die Verkehrssicherheit stellt sich als ein aggregiertes (emergentes) Verhalten dar [Schnieder 2014]. Dabei bilden sich die untersten (mikroskopische und mesoskopische) Ebenen der Fahrprozessregelung nur induziert ab. Hinsichtlich der zeitlichen Synchronizität der unterschiedlichen Hierarchieebenen im komplexen Mehrgrößenregelsystem zeigt sich, dass, je aggregierter das System betrachtet wird, die sichtbaren Einflüsse entsprechend verzögert auftreten [Schnieder 2014] [Leveson 2011]. Eine praktische Realisierung eines komplexen-kaskadierten Mehrgrößenregelsystems wurde bereits von [Welfonder 2007] vorgestellt in seinen Arbeiten zum



76

„Um nun mit diesen Einflussmöglichkeiten die Verkehrssicherheit zielgerichtet zu beeinflussen, sind entsprechende Regler und Begrenzungen bzw. Barrieren notwendig, welche mit entsprechenden Sollwerten und vor allem geeignet erfassten Regelgrößen gespeist werden.“
(nach [Schnieder 2014])

Über eine Zuordnung der Einflussmöglichkeiten in dem komplexen Mehrgrößenregelsystem lässt sich in diesem Modellkonzept eine Induzierbarkeit der Einzelereignisse und somit ein Rückschluss auf das Verkehrssystem herstellen.

5.3.3 Aggregierte stochastische Modellkonzepte

In Abschnitt 4.3.2 wurden bereits regelungstechnische Verfahren der Systemidentifikation vorgestellt. Das hier vorgestellte aggregierte stochastische Modellkonzept überträgt die mathematischen Verfahren und Modelle der Regelungstechnik auf eine makroskopische Systemperspektive und findet bisher hauptsächlich in der Forschung Anwendung.

Es wird zunächst eine aggregierte Grundlage über das regelungstechnische Basisverständnis für ein makroskopisches Modell der Verkehrssicherheit gelegt. Diesen theoretischen Rahmen liefert der Forschungsbeitrag von [Schnieder 2014]. Das in Abbildung 5-4 von [Schnieder 2014] erarbeitete Blockschaltbild eines regelungstechnischen Modells der Verkehrssicherheit stellt eine Realisierung eines makroskopischen Verkehrssicherheitsmodells dar und basiert in seinen Grundzügen auf dem Modell der Risikogenese (vgl. Abschnitt 1.4 und 4.3.2):

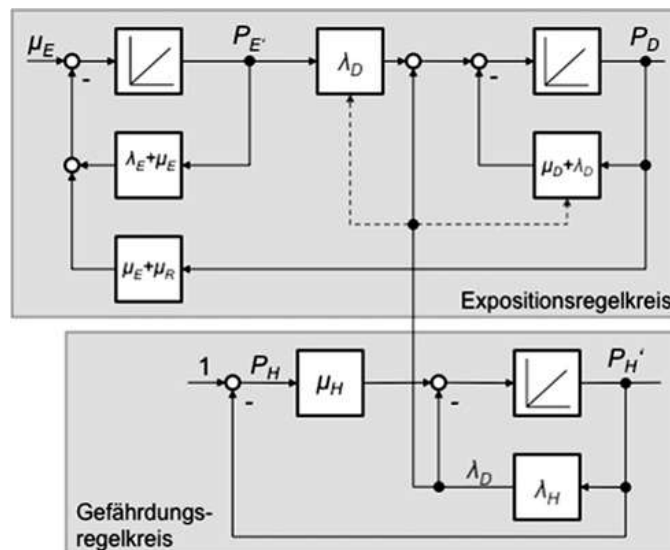


Abbildung 5-4: Regelungstechnisches Blockschaltbild Expositions- bzw. Schadens- und des Gefährdungsverhaltens, nach [Schnieder 2014]

Der obere Teil des Blockschaltbilds stellt den Expositionsregelkreis als dynamisches System zweiter Ordnung dar. Der Expositionsregelkreis ist von dem Gefährdungsregelkreis (unterer Teil des Blockschaltbilds) über die Schadensrate λ_D als Einflussgröße manipulierbar. Die Schadensrate ist Ausgangsgröße des Gefährdungsregelkreises und resultiert aus einem Integrator sowie zwei proportionalen Rückführungen: der Gefährdungsrate λ_H sowie der Behebungsrate μ_H für erkannte Gefährdungen. Der Regelkreis ist so ausgelegt, dass ein Zustand absoluter Sicherheit nie erreicht werden kann.

Aufgrund des hohen Aggregationsgrads des regelungstechnischen Modells von [Schnieder 2014] lässt sich dieses mit seinen theoretischen Grundlagen verwenden, muss aber signifikant de-aggregiert werden, um unterschiedliche Maßnahmen an unterschiedlichen Systemkonstituenten betrachten zu können.

5.3.4 Aggregierte regelungstechnische Modellkonzepte

Eine ansatzweise Lösung für ein aggregiertes regelungstechnisches Modellkonzept stellt die Arbeit von [Welfonder 2007] dar, auch wenn diese eine nicht-verkehrliche Fragestellungen adressiert. [Welfonder 2007] erarbeitet ein hierarchisch aufgebautes sozio-ökonomisches Gesamtmodell der Volkswirtschaft mit regelungstechnischen Blockschaltbildern (vgl. Abbildung 5-5).

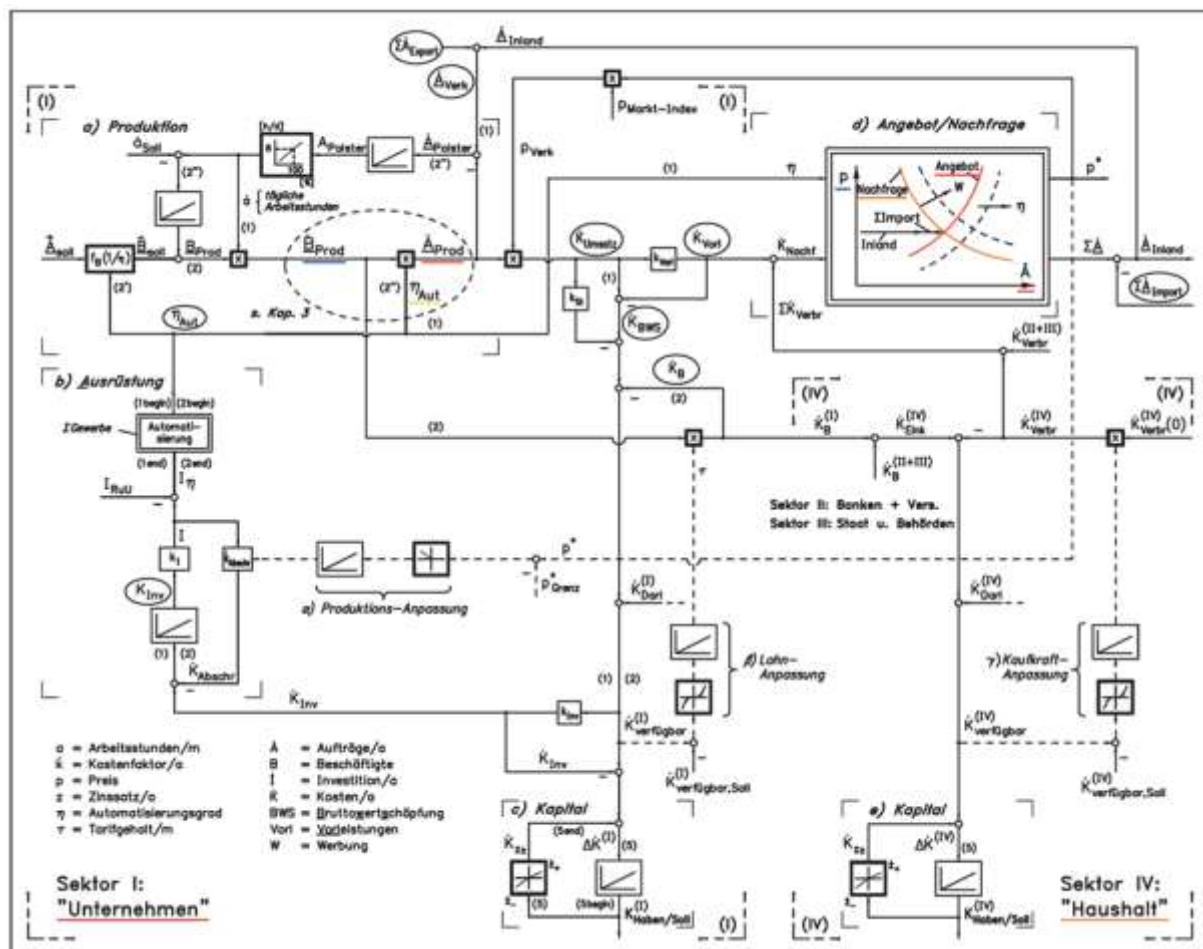


Abbildung 5-5: Regelungstechnisches Modell eines soziotechnischen Systems, nach [Welfonder 2007]

Das Gesamtmodell gliedert sich in supranationale Wirtschafts- und Kulturbereiche, wobei der Deutsche Volkswirtschaftsraum eine detaillierte Differenzierung erfährt. Hier werden sog. Sektoren (Haushalte, Unternehmen, Banken und Versicherungen, Staat) regelungstechnisch modelliert. Die starke Vernetzung der Sektoren kann durch das regelungstechnische Modell abgebildet werden. Auch wenn das Modell in seinem aktuellen Arbeitsstand die Sektoren wiederum aggregiert betrachtet, lässt die Modellierung eine differenzierte Abbildung jedes sektoralen Bereichs zu. Die mit dem Modell adressierte Fragestellung soll klären, inwieweit in Zeiten zunehmender Automatisierung diverser Arbeitsgebiete der wirtschaftliche Wohlstand einer Gesellschaft ge-

zielt erhalten werden kann. Demnach kann das Modell ein komplexes sozio-ökonomisches System nicht nur in seinem Verhalten abbilden und simulativ prognostizieren, sondern gleichzeitig das Systemverhalten durch Einspeisung gezielter Maßnahmen, bzw. Parameterveränderungen, abbilden [Welfonder 2007].

Auf Basis der vorhergehenden Betrachtung kann davon ausgegangen werden, dass, wenn auch der Stand der Forschung und Technik im Bereich der regelungstechnischen Modelle zur Prognose der Verkehrssicherheit noch nicht die gesetzte Fragestellung beantwortet, so scheinen doch die Modellkonzepte der Regelungstechnik in der Lage zu sein das Problem abzubilden.

5.3.5 Kybernetische Modellkonzepte

Wie bereits in Abschnitt 4.4.1 erläutert worden ist, trifft die Kybernetik die Annahme, dass ein System regelbar ist. Hierin lässt sich ein kybernetisches Modellkonzept finden. System Dynamics ist eine von [Forrester 1969] entwickelte Methode zur ganzheitlichen Analyse und Modellsimulation komplexer und dynamischer Systeme im sozioökonomischen Kontext [Boysen 2011] und basiert auf einem kybernetischen Modellkonzept: Das dynamische Verhalten komplexer Systeme kann mit Hilfe von rückgekoppelten Variablenbeziehungen beschrieben werden [Forrester 1969] [Niemeyer 1977].

In der ursprünglichen Ausprägung von System Dynamics, damals noch Industrial Dynamics genannt, wurde System Dynamics als eine Managementdisziplin entwickelt. Nach [Morecroft 1988] kann ein Unternehmen mit seiner Umgebung mittels System Dynamics als eine Sammlung von Entscheidungen und Aktionen menschlicher Systemkomponenten verstanden werden [Morecroft 1988]. [Forrester 1969] definiert die Methode folgendermaßen:

„Industrial dynamics is the study of the information-feedback characteristics of industrial activity to show how organizational structure, amplification (in policies), and time delays (in decision and actions) interact to influence the success of the enterprise. It treats the interactions between the flows of information, money, orders, materials, personnel, and capital equipment in a company, an industry or a national company.“ [Forrester 1969]

Der hinter System Dynamics stehende kybernetische Modellansatz schließt ein, dass sich das Verhalten eines komplexen Systems auf Basis von dessen Struktur ergibt [Stermann 2004]. Das Verhalten eines Systems kann mittels System Dynamics als emergente Systemeigenschaft verstanden werden, die sich erst durch Systemstruktur zeigt (vgl. Abschnitt 5.2). Demnach kann erst das Verhalten eines Systems gezielt beeinflusst werden, wenn dessen Struktur bekannt ist [Wansart 2012] [Nielsen u. Nielsen 2008]. System Dynamics verfolgt daher eine holistische/aggregierte Sichtweise auf Systeme und nicht eine atomistische [Forrester 1994].

Durch die explizite Beschreibung der relevanten Systemkomponenten und ihrer Verbindungen miteinander wird ein System Dynamics Modell agil entwickelt. Ausgehend von einer dynamischen Hypothese über das generelle Systemverhalten wird das Modell iterativ weiterentwickelt und verfeinert. Dabei ist System Dynamics mathematisch so konzipiert, dass dynamische Rückkopplungsbeziehungen mittels verschachtelter Differentialgleichungen berechnet werden [Jackson 2003] [Stermann 2004] [Karnopp et al. 1990]. Das Verhalten des Gesamtsystems ist von diesen Rückkopplungen zwischen den Systemelementen maßgeblich bestimmt [Forrester 1961]. Einzelne Aktionen und Entscheidungen im System sind nicht unabhängig voneinander und beeinflussen das gesamte Systemverhalten [Ulrich 1970]. Die Rückkopplungsbeziehungen zwischen einzelnen Elementen können stärker oder schwächer ausgeprägt sein [Kapmeier 2003]. Es

kann davon ausgegangen werden, dass, je mehr Rückkopplungsaktivitäten in einem System existieren, desto größer gestaltet sich die innere Dynamik des Systems. Die Rückkopplungseffekte können dabei entgegengerichtet oder gleichgerichtet sein:

- Entgegengerichtete Rückkopplungseffekte liegen vor, wenn die Änderung einer Systemvariablen zu einer gegenläufigen Änderung einer kausal-verbundenen Variablen führt.
- Gleichgerichtete Rückkopplungseffekte liegen vor, wenn die Änderung einer Variablen eine gleichgerichtete Änderung einer kausal-verbundenen Variablen hervorruft [Ulrich u. Probst 1995] [Kapmeier 2003].

Da System Dynamics ein System mittels kontinuierlicher Differentialgleichungssysteme modelliert, können diese über den aktuellen Zeitpunkt hinaus simuliert werden und treffen daher prognostische Aussagen über das zukünftige Verhalten eines Systems [Forrester 1994]. Das Modellkonzept erlaubt demnach die Anwendung von System Dynamics zur Wirkungsanalyse von Maßnahmen [Senge 2008] [Nonn 2009] [Schöneborn 2004] [Gomez 1993]. Die Methode System Dynamics von [Forrester 1969] liefert zahlreiche Beispiele für die Modellierung von Verkehrsflüssen und Sicherheitsmaßen [Wen-Hui et al. 2010] [Minami u. Madnick 2010] [Torres et al. 2012] [Nachimuthu u. Partheeban 2013]. Diese Anwendungen berücksichtigen meistens nur mesoskopische Wirkzusammenhänge, wie z. B. Ausbildungseffekte (vgl. Abschnitt 2.2.1), Policy Maßnahmen (vgl. Abschnitt 2.2.2) oder Fahrererfahrung (vgl. Abschnitt 2.2.1) auf die Unfallentwicklung.

Das von [Wansart 2012] entwickelte Modell der Gesetzesfolgenabschätzung nutzt Methoden der Discrete Choice Theory. Die Forschungsarbeit stellt ein quantitatives Lager-Fluss-Diagramm auf und ist in der Lage ein komplexes Verkehrssystem in makroskopischer Perspektive zu modellieren. Die hier avisierte Fragestellung fokussiert eher die Wirkungsanalyse von gesetzlichen Maßnahmen auf die Marktpenetrationsraten bestimmter Fahrzeugtypen. Im Rahmen einer Vorarbeit von [Wansart 2012] wurde bereits ein vereinfachtes makroskopisches Modell der Verkehrssicherheit erstellt: Es wurde ein Bass-Diffusionsmodell erstellt, um den Einfluss der Einführungsrate vom elektronischen Stabilisierungsprogramm auf das Unfallaufkommen herzustellen [Wansart u. Schnieder 2007].

Eine im Vorfeld dieser Arbeit durchgeführte Studie erarbeitet mittels der Anwendung der STAMP-Methode (Abschnitt 5.2.3) den Einfluss ausgewählter Fahrerassistenzsysteme auf das Unfallaufkommen [Hosse 2011] [Beisel et. al. 2012]. Das dort bereitgestellte System Dynamics-Modell (vgl. Abbildung 5-6) konnte aufgrund der vorliegenden Wirkungskomplexität nicht erfolgreich quantifiziert werden. Zwar bietet die Arbeit im Vergleich zu [Wansart 2012] eine differenziertere Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit an, allerdings muss mit dem Ziel der Prognose der Verkehrssicherheit ein quantitatives Modell vorliegen. Das Modell ist exemplarisch als Kausalschleifendiagramm in Abbildung 5-6 bereitgestellt.

Es lässt sich im Stand der Forschung bisher kein konsequent angewendetes kybernetisches Modellkonzept im Rahmen einer Modellierung und Prognose der Verkehrssicherheit finden. Das kybernetische Modellkonzept zeigt sich grundlegend in der Lage die avisierte Fragestellung beantworten zu können, wobei hier noch eruiert werden muss, inwieweit die konkrete Ausprägung des System Dynamics-Ansatzes ein geeignetes Verfahren ist.

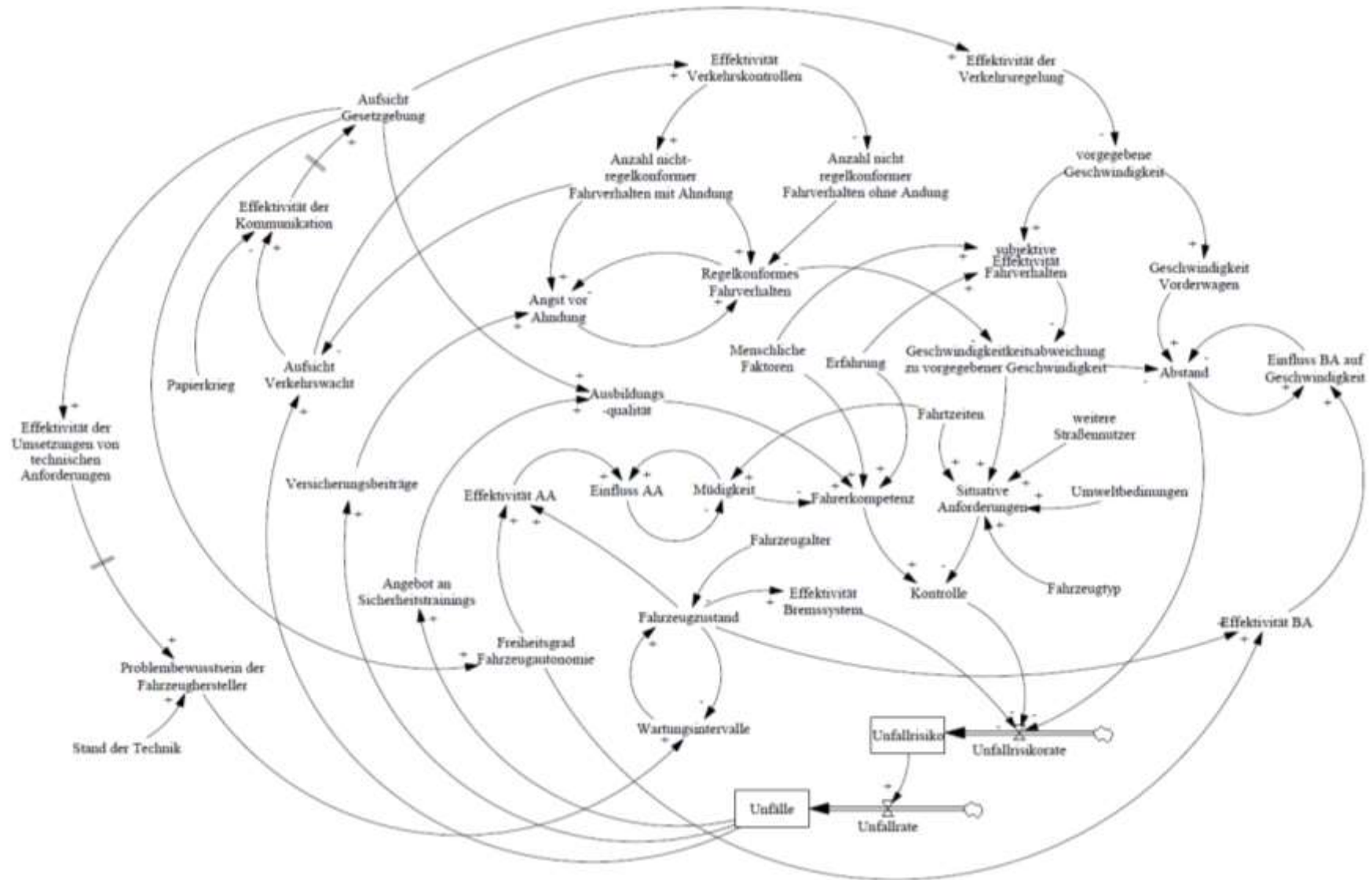


Abbildung 5-6: Kausalschleifendiagramm der Verkehrssicherheit unter Einfluss ausgewählter Maßnahmen, nach [Hosse 2011]

Es kann festgehalten werden, dass trotz des hohen Komplexitätsgrads ein grundlegendes Verständnis über das Straßenverkehrssystem besteht und eine Prognose im engeren Sinne (vgl. Abschnitt 4.1.1) durchführbar ist. Auf Basis der Eingrenzung eines anwendbaren systemtheoretischen Modellkonzepts lassen sich Verhaltenseigenschaften identifizieren, die begründbar eine bestimmte Systemmechanik einem Prognosemodell zugrundeliegen lassen. Es bietet sich hier an ein ingenieurs- und wirtschaftswissenschaftliches Modellkonzept anzuwenden. Biologische und psychologische Modellkonzepte eignen sich aufgrund des makroskopischen Auflösungsgrads der avisierten Betrachtung nicht.

Die Straßenverkehrssicherheit resultiert insgesamt aus einem komplexen Wirkungsgeflecht individueller, gesellschaftlicher, politischer, juristischer, wirtschaftlicher und technischer Interaktionen und Entscheidungen, wie in den Kapiteln 1 und 1 gezeigt wurde. Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführte Vorarbeit [Hosse 2011] konnte eine Hypothese über die makroskopische Struktur des Straßenverkehrssystems aufstellen. Diese trifft die Annahme:

Das Diagramm zeigt die folgenden Variablen und deren Wechselwirkungen:

- Getöteten im Straßenverkehr** (oben Mitte): Hat eine positive Selbstverstärkung (+) und eine positive Wirkung auf **Sicherheitsfördernde Maßnahmen** (+).
- Sicherheitsfördernde Maßnahmen** (oben rechts): Hat eine negative Wirkung auf **Getöteten im Straßenverkehr** (-) und eine negative Wirkung auf **Gefährdungen** (-).
- Gefährdungen** (unten rechts): Hat eine positive Wirkung auf **Unfallschwere** (+).
- Unfallschwere** (unten Mitte): Hat eine positive Selbstverstärkung (+) und eine positive Wirkung auf **Nettozunahme Getöteter im Straßenverkehr** (+).
- Nettozunahme Getöteter im Straßenverkehr** (unten links): Hat eine positive Wirkung auf **Getöteten im Straßenverkehr** (+) und eine positive Wirkung auf **fraktionierte Nettozunahme Getöteter im Straßenverkehr** (+).
- fraktionierte Nettozunahme Getöteter im Straßenverkehr** (links): Hat eine positive Wirkung auf **Nettozunahme Getöteter im Straßenverkehr** (+).

Zusätzlich gibt es eine direkte positive Verbindung von **Getöteten im Straßenverkehr** zu **Nettozunahme Getöteter im Straßenverkehr** (+).

82

Stellt man die zuvor benannte Hypothese im Rahmen eines Kausalschleifendiagramms (siehe Abbildung 5-7) auf Basis eines kybernetischen Modellkonzepts nach [Forrester 1994] und [Sternman 2009] auf, so zeigt das Verkehrssystem folgende Wirkbeziehung:

- Abhängig von der Zahl „*Getöteter im Straßenverkehr*“ erhöhen sich kausal die „*sicherheitsfördernden Maßnahmen*“ mit dem Ziel der Reduzierung der im System bestehenden „*Gefährdungen*“.
- Der Systemparameter der „*Unfallsschwere*“ verringert sich aufgrund der geringeren Gefährdungspotentiale und damit kausal die Raten der „*Getöteten im Straßenverkehr*“.

Entsprechend dem Kausalschleifendiagramm erreicht das System nach einer bestimmten Zeit mit einem bestimmten exponentiell-steigenden Verhalten einen Maximalwert (19.193 Getötete im Jahr 1970) und strebt danach exponentiell fallend einen Zielwert an. Die in der hypothetischen Struktur aus Abbildung 5-7 gezeigten Zusammenhänge und ihre Veränderungen erfordern eine wesentlich leistungsfähigere Modellrealisierung als es in [Hosse 2011] (siehe Abschnitt 5.3.5) bereitgestellt wird oder in der Erhebung der verfügbaren datenbasierten Prognoseverfahren (vgl. Abschnitt 4.3) und Wirkungsanalysen (vgl. Abschnitt 4.5) bisher erfolgt ist. Die kausalen Zusammenhänge unterliegen u. a. signifikanten Paradigmenwechseln (z. B. begleitetes Fahren, Novellierung der Fahrschulausbildung, etc.) und technologisch bedingten Veränderungen (z. B. Elektromobilität, autonomes Fahren, etc.), welche eine umfassende Modellbildung des Verkehrssystems erfordern, um die Entwicklung der Verkehrssicherheit abschätzen zu können, bzw. Trends zu erkennen [Amalberti 2001].

Das in dieser Arbeit anzuwendende Modellkonzept sieht folglich Aspekte der ingenieurs- und wirtschaftswissenschaftlichen Modellkonzepte, dem Modellkonzept der Unfallforschung und den kybernetischen Modellkonzepten vor.

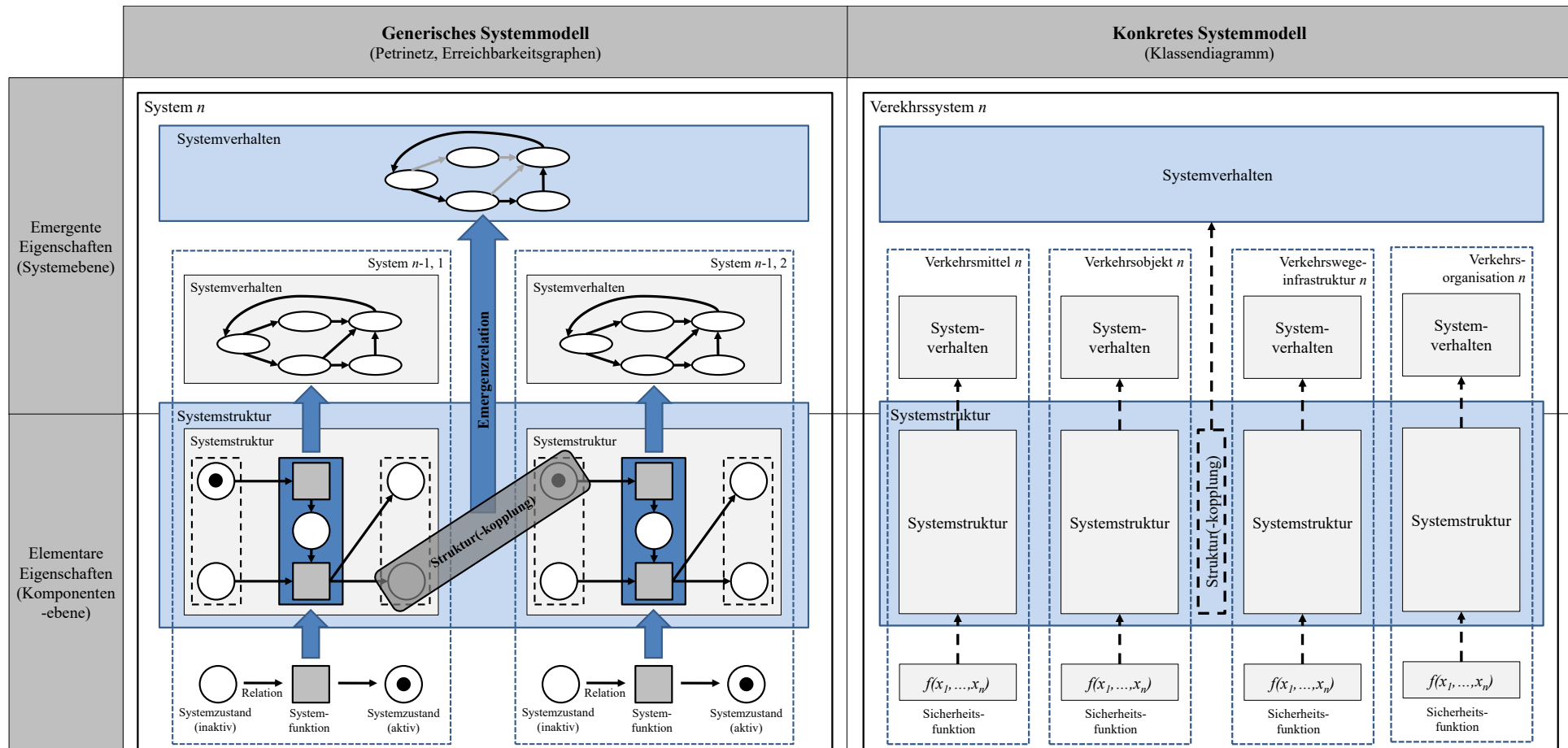


Abbildung 5-8: Generisches und konkretes Systemmodell mit Emergenzrelationen, in Anlehnung an [Schnieder 2009]

6 Konzeption und Entwicklung des Prognoseverfahrens

"Die physikalischen Modelle unterscheiden sich von der Realität wie die geographischen Karten von der Erdoberfläche.

(Léon Nicolas Brillouin)

In diesem Kapitel wird die Konzeption und Entwicklung des modellbasierten Prognoseverfahrens der Straßenverkehrssicherheit durchgeführt. Basierend auf den vorhergehenden Erkenntnissen (vgl. Abschnitt 2.5, 4.6 und 5.4) werden in dem Abschnitt 6.1 die Anforderungen an das Prognoseverfahren zusammengetragen. Daraufhin werden relevante datenbasierte (vgl. Abschnitt 4.3) und modellbasierte Prognoseverfahren (vgl. Abschnitt 4.4) in Abschnitt 6.2 qualifiziert und die Auswahl eines geeigneten Prognoseverfahrens vorgenommen. In den sich anschließenden Abschnitten wird das für das Prognoseverfahren relevante Sicherheitspotential (siehe Abschnitt 6.3) und das eigentliche Prognosemodell (siehe Abschnitt 6.4) definiert.

6.1 Anforderungen an das modellbasierte Prognoseverfahren

Die Anforderungen an die Wirkfeld-Prognose orientieren sich an den grundlegenden Anforderungen an prognosefähige Modelle von [Alvin et.al. 1998], [Hanson 1999] und [Doebling 2002] sowie den Anforderungen hinsichtlich der formulierten Fragestellung aus den Abschnitten 1.4 und 1.5 sowie den vorhergehenden Betrachtungen hinsichtlich geeigneter Prognoseverfahren (vgl. Abschnitt 4.6) und Modellkonzepte (vgl. Abschnitt 5.4).

Bei der Formulierung der Anforderung wird ein vereinfachtes Anforderungsmanagement zugrundegelegt. Die Anforderungen an das Modell sollen dabei atomar (nicht teilbar) sein und zwischen „muss-“, „soll-“ und „kann-“Anforderungen unterscheiden:

- „*Muss*“-Anforderungen sind zwingend zu erfüllen, wenn dieser Typ Anforderungen im Rahmen der Qualifizierung nicht eingehalten werden kann, ist das Prognosemodell nicht hinreichend.
- „*Soll*“-Anforderungen steigern die Qualität des Prognosemodells, sind aber nicht zwingend erforderlich einzuhalten.
- „*Kann*“-Anforderungen haben die geringste Notwendigkeit bei der Anforderungserfüllung und stellen einen Wunsch an das Prognosemodell dar.

Entsprechend [Alvin et.al. 1998], [Hanson 1999] und [Doebling 2002] gibt es fünf relevante Anforderungskategorien an prognosefähige Modelle:

1. Modellvereinfachung und -diskretisierung
2. Modellkonzept und Parametrierung
3. Physikalischer Geltungsbereich
4. Modellgrenzen

5. Zulässige Grenzwerte und Abweichungen

In den folgenden Abschnitten 6.1.1 bis 6.1.5 werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Modell näher erläutert und begründet.

6.1.1 Modellvereinfachung und --diskretisierung

Die erste Anforderungskategorie an ein Prognosemodell nach [Alvin et.al. 1998], [Hanson 1999] und [Doebeling 2002] stellt Anforderungen hinsichtlich der erlaubten Modellvereinfachung und -diskretisierung. Hierunter ist zu verstehen, dass das Modell einerseits einen ausreichenden Grad der Vereinfachung aufweist, um realisierbar zu bleiben, gleichzeitig aber auch das zugrundeliegende Modellkonzept (vgl. auch 6.1.2) hinreichend präzise ist, um die Prognosefrage modelltheoretisch abzubilden. Insbesondere für datenbasierte Prognoseverfahren ist hier die gewählte Diskretisierung der betrachteten Zeitreihen entscheidend.

An das zu entwickelnde Prognosemodell stellen sich für die Modellvereinfachung und -diskretisierung folgende in der Tabelle 6-1 zusammengefasste Anforderungen.

Tabelle 6-1: Anforderungen hinsichtlich der Modellvereinfachung und -diskretisierung

Nr. ⁵	Anforderung	Quelle
Anf_01	Das Prognosemodell kann zwischen Fahrzeugklassen unterscheiden	[Ammoser u. Hoppe 2006]
Anf_02	Das Prognosemodell muss ausreichend einfach aufgebaut werden, so dass es mittels verfügbarer Computerrechenleistung simuliert werden kann	[Stermann 2004]
Anf_03	Das Prognosemodell muss die Wirkung aller Arten von Verkehrssicherheitsmaßnahmen am <i>Verkehrsmittel</i> prognostizieren können	vgl. Abschnitt 2.1.1
Anf_04	Das Prognosemodell muss die Wirkung aller Arten von Verkehrssicherheitsmaßnahmen am <i>Verkehrsobjekt</i> prognostizieren können	vgl. Abschnitt 2.2
Anf_05	Das Prognosemodell muss die Wirkung aller Arten von Verkehrssicherheitsmaßnahmen an der <i>Verkehrsinfrastruktur</i> prognostizieren können	vgl. Abschnitt 2.1.2
Anf_06	Das Prognosemodell muss die Wirkung aller Arten von Verkehrssicherheitsmaßnahmen an der <i>Verkehrsorganisation</i> prognostizieren können	vgl. Abschnitte 2.3 und 2.4
Anf_07	Das Prognosemodell muss das Unfallaufkommen für alle statistisch erfassten Arten von Unfällen im Verkehrssystem betrachten können	[Armstrong et.al. 2015]

⁵ Die Reihung der Anforderung erfolgt alphabetisch, dies gilt für alle folgenden Anforderungstabellen.

Nr. ⁵	Anforderung	Quelle
Anf_o8	Wenn das Modell mittels <i>mathematischer Modellkonzepte</i> realisiert wird, muss das Prognosemodell einen fest gewählten Diskretisierungsabstand wählen	[Elvik 2014]

6.1.2 Modellkonzept und Parametrierung

Die zweite Anforderungskategorie deckt Aspekte des zugrundeliegenden Modellkonzepts und der gewählten Parameterierung ab. Beide Aspekte sind bei der Wahl des Prognoseverfahrens relevant. Bereits durch die Wahl eines bestimmten Modellkonzepts ist oftmals ein spezifisches Prognoseverhalten zu erwarten (vgl. Abschnitt 5.4), gleiches betrifft die Auswahl relevanter Parameter. Daher sind an das zu entwickelnde Prognosemodell Anforderungen dahingehend zu formulieren, dass eine möglichst hohe Prognosegenauigkeit durch eine fundierte Auswahl des Modellkonzepts und der Modellparameter gewährleistet wird – dies ist in der Betrachtung des Stands der Forschung und Technik hinsichtlich der verfügbaren Modellkonzepte für die Verkehrssicherheitsprognose erfolgt, vgl. hierzu Kapitel 1.

Die sich an die konkrete Modellrealisierung in dieser Arbeit stellenden Anforderungen an das Modellkonzept und die Parametrierung sind in der folgenden Tabelle 6-2 zusammengefasst.

Tabelle 6-2: Anforderungen hinsichtlich des Modellkonzepts und der -parameter

Nr.	Anforderung	Quelle
Anf_o9	Das Prognosemodell muss ein Modellkonzept verwenden, welches bei vorliegender Vereinfachung ein hinreichend genaues Systemverhalten abbildet	[Armstrong et.al. 2015]
Anf_10	Wenn das Modell mittels eines systemtheoretischen Modellkonzepts realisiert wird, müssen kausale Zusammenhänge so weit möglich zerlegt werden	[Wansart 2011]
Anf_11	Bei Verwendung eines <i>systemtheoretischen Modellkonzepts</i> muss das Prognosemodell allgemeingültige kausale Zusammenhänge nutzen; diese müssen belegt werden	[Stermann 2004]
Anf_12	Das Prognosemodell muss ein einheitliches Sicherheitsmaß für die Wirkung von Verkehrssicherheitsmaßnahmen definieren	vgl. Abschnitt 1.5
Anf_13	Das Prognosemodell muss den inneren Aufbau des modellierten Verkehrssystems glaubwürdig wiedergeben	[Elvik 2014]
Anf_14	Das Prognosemodell muss ein Modellkonzept verwenden, welches mittels einer öffentlich verfügbaren Datenbasis eine Prognose herstellen kann ⁶	vgl. Abschnitte 1.4 und 4.3

⁶ Im Rahmen dieser Arbeit bestand nicht die Möglichkeit auf in-depth-Unfalldatenbanken zuzugreifen, daher muss ein Prognoseverfahren entwickelt werden, welches auf Basis einer öffentlich verfügbaren Datenbasis angewendet werden kann.

Nr.	Anforderung	Quelle
Anf_15	Das Prognosemodell muss eine beliebig große Anzahl von Einflussfaktoren in die Prognose einbeziehen können	[Fildes u. Petropoulos 2015] und Abschnitt 2.5
Anf_16	Das Prognosemodell muss zum Zeitpunkt der Modellbildung unerwartete Systemantworten mit hinreichender Plausibilität wiedergeben	[Elvik 2014]

6.1.3 Physikalischer Geltungsbereich

Die dritte Anforderungskategorie nach [Alvin et.al. 1998], [Hanson 1999] und [Doebbling 2002] betrachtet Aspekte über den physikalischen Gültigkeitsbereich des Prognosemodells. Hierunter ist zu verstehen, dass grundlegend gültige Aspekte der Physik durch das Prognosemodell eingehalten werden müssen. Im Anwendungsfall der Verkehrssicherheitsprognose wäre hier z. B. eine Abweichung vom physikalischen Gültigkeitsbereich, wenn das Modell ein Unfallaufkommen mit negativen Vorzeichen prognostiziert.

Folgende Anforderungen ergeben sich daher an den physikalischen Gültigkeitsbereich des zu entwickelnden Prognosemodells.

Tabelle 6-3: Anforderungen hinsichtlich des physikalischen Gültigkeitsbereichs des Modells

Nr.	Anforderung	Quelle
Anf_17	Das Prognosemodell muss bekannte Verkehrssicherheitsbeobachtungen mit hinreichender Genauigkeit abbilden	[Wansart u. Schnieder 2009]
Anf_18	Das Prognosemodell muss die physikalischen Größen (Dimensionen) einhalten	[Armstrong et.al. 2015]
Anf_19	Das Prognosemodell muss eine aggregierte Betrachtung des Unfallaufkommens durchführen (makroskopische Perspektive)	vgl. Abschnitte 1.4 und 5.2.4
Anf_20	Das Prognosemodell muss keine Widersprüche zu bekannten Beobachtungen aufweisen	[Armstrong et.al. 2015]
Anf_21	Das Prognosemodell soll physikalische Effekte plausibel abbilden können	[Elvik 2014]
Anf_22	Das Prognosemodell soll den größtmöglichen Zeithorizont historischer Zeitreihen nutzen	[Elvik 2014]

6.1.4 Modellgrenzen

Die vierte Kategorie an Anforderungen an Prognosemodelle betrifft die Modellgrenzen. Hierunter ist die Abgrenzung des Modells zu seiner Betrachtungsumgebung zu verstehen. Es konnte bereits in Abschnitt 4.1.3 gezeigt werden, dass mögliche, nicht betrachtete Einflussfaktoren einen signifikanten Einfluss auf das Prognoseverhalten, bzw. reale Systemverhalten haben können. Daher ist es entscheidend, dass die Modellgrenzen für das Prognosemodell alle bekannten Nebeneffekte abbilden, bzw. berücksichtigen. Die Systemgrenzen müssen eindeutig definiert werden.

Folgende Anforderungen ergeben sich daher an die zu wählenden Modellgrenzen, zusammengefasst in der folgenden Tabelle 6-4.

Tabelle 6-4: Anforderungen hinsichtlich der Modellgrenzen

Nr.	Anforderung	Quelle
Anf_23	Das Prognosemodell muss das deutsche Straßenverkehrssystem betrachten ⁷	vgl. Abschnitt 1.4
Anf_24	Das Prognosemodell kann nicht die erwartete Wirkung einer Maßnahme bestimmen, sondern deren Effekt im Gesamtverkehrssystem prognostizieren	vgl. Abschnitte 1.4 und 1.5
Anf_25	Das Prognosemodell muss nicht sog. Beinahe-Unfälle prognostizieren können	vgl. Abschnitt 1.4, insb. Abbildung 1-3
Anf_26	Das Prognosemodell kann sicherheitsaverse Effekte bestimmen	vgl. Abschnitt 2.5

6.1.5 Zulässige Grenzwerte und Abweichungen

Die fünfte Anforderungskategorie nach [Alvin et.al. 1998], [Hanson 1999] und [Doebling 2002] berücksichtigt die zulässigen Grenzwerte und Abweichungen, die das Prognosemodell erlauben darf. Durch Einhaltung der Grenzwerte und möglicher Abweichungen wird ein Vertrauen in das Modell gebildet und das prognostizierte Verhalten ist plausibel. Bei der Betrachtung der verschiedenen Prognoseverfahren in den Abschnitten 4.3, 4.4 und 4.5 konnte bereits gezeigt werden, dass gute Prognosemodelle sich dadurch auszeichnen, dass sie Konfidenzintervalle, bzw. alternative Prognoseszenarien (Sensitivitätsanalysen) bereitstellen. Bei datenbasierten Prognoseverfahren (siehe Abschnitt 4.3) lassen sich durch Standardverfahren Konfidenzintervalle der prognostischen Aussagen bestimmen. Gegenüber modellbasierten Prognoseverfahren ergibt sich hier ein breiteres Spektrum von Anforderungen, da dieses Modell die kausalen Wirkbeziehungen des Systems abbildet und demnach die Parametrierung entscheidender ist (siehe Abschnitt 6.1.2). Insbesondere bei den Wirkungsanalysen (siehe Abschnitt 4.5) ist eine Sensitivitätsanalyse und Parametervariation entscheidend, da eine Vielzahl von Einzelereignissen miteinander kombiniert und extrapoliert werden kann. Einen anderen Aspekt stellt die Nachbildung der Input-Zeitreihen dar: Wenn das Prognosemodell in der Lage ist die vergangene Zeitreihe abzubilden (das können z. B. modellbasierte Prognoseverfahren) und sich hier eine signifikante Abweichung von den Originalzeitreihen zeigt, kann davon ausgegangen werden, dass die Prognose keine hinreichende Qualität gewährleistet und dem Modell nicht vertraut werden kann.

Die relevanten Anforderungen an die zulässigen Grenzwerte des Prognosemodells und erlaubten Abweichungen sind in der folgenden Tabelle 6-5 zusammengefasst.

⁷ Bei ausreichender Generizität des entwickelten Prognoseverfahrens ist eine Anwendung in anderen Verkehrssystemen denkbar, z. B. US-amerikanisches Straßenverkehrssystem; vgl. hierzu Abschnitt 8.2.

Tabelle 6-5: Anforderungen hinsichtlich der zulässigen Grenzwerte und Abweichungen

Nr.	Anforderung	Quelle
Anf_27	Bei Verwendung eines systemtheoretischen Modellkonzepts muss das Prognosemodell eine Sensitivitätsanalyse (unterschiedliche Szenarien der Prognose) durchführen	[Stermann 2004]
Anf_28	Das Prognosemodell muss ein plausibles Systemverhalten prognostizieren	[Elvik 2014]
Anf_29	Wenn das Prognosemodell in der Lage ist die Originalzeitreihe abzubilden, muss es eine hinreichende Genauigkeit aufweisen	

Nachdem die Anforderungen an das zu entwickelnde Prognosemodell zusammengetragen und definiert worden sind, kann die Qualifizierung der verschiedenen bekannten Prognoseverfahren durchgeführt werden.

6.2 Qualifizierung der verfügbaren Prognoseverfahren

Die Erhebung der verfügbaren Prognoseverfahren (vgl. Abschnitt 4.6) hat bisher nicht ergeben, welches Verfahren konkret angewendet werden kann. Insbesondere sind die verfügbaren Prognoseverfahren noch nicht gegen die Anforderungen an das Prognosemodell geprüft worden (vgl. Abschnitt 6.1). Demnach werden im Folgenden die bekannten datenbasierten und modellbasierten Prognoseverfahren einer Qualifizierung gegenüber den hier gestellten Anforderungen unterzogen. Die Qualifizierung erfolgt nach dem in der Abbildung 6-1 dargestellten Vorgehensmodell:

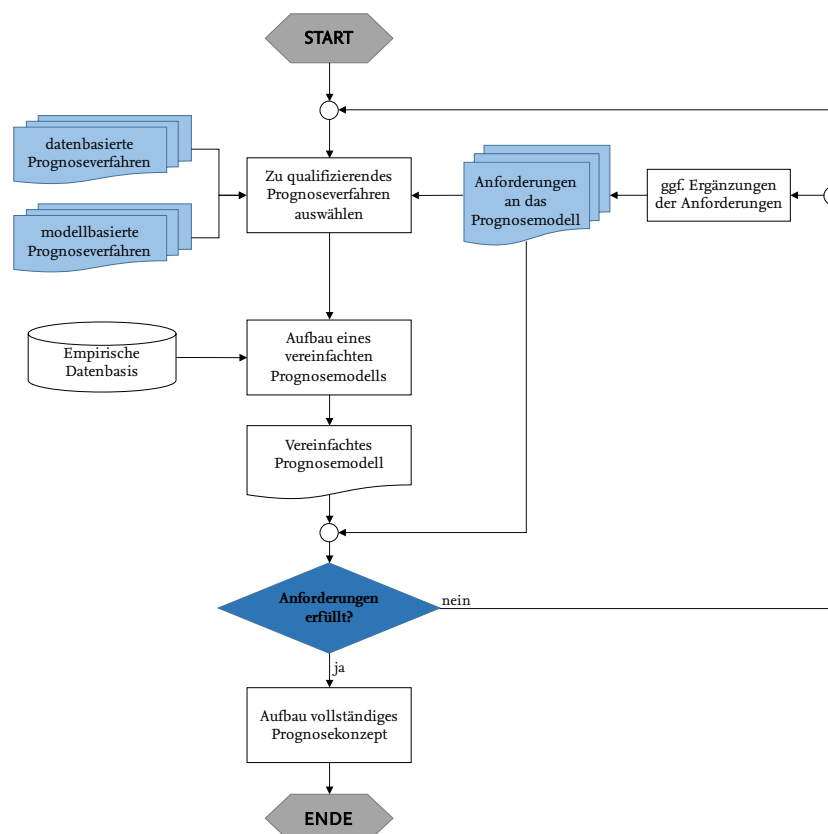


Abbildung 6-1: Vorgehensmodell der Qualifizierung

Es werden die potentiell nutzbaren datenbasierten (vgl. Abschnitt 6.2.1) und modellbasierten Prognoseverfahren (vgl. Abschnitt 6.2.2) in einer vereinfachten praktischen Umsetzung hinsichtlich des Erfüllungsgrads gegenüber den Anforderungen (vgl. Abschnitt 6.1) geprüft. Neben den isolierten Anwendungen der datenbasierten und modellbasierten Ansätze erfolgt in den Abschnitten 6.2.2.2 und 6.2.2.3 eine exemplarische Anwendung hybrider Modellansätze (welche in dieser Arbeit auch als modellbasierte Ansätze klassifiziert sind). Die Ergebnisse der vereinfachten exemplarischen Anwendungen werden insbesondere hinsichtlich der Anforderungen an den physikalischen Geltungsbereich (siehe Abschnitt 6.1.3) und die zulässigen Grenzwerte (siehe Abschnitt 6.1.5) geprüft. Sobald ein Prognoseverfahren identifiziert werden konnte, welches einen hinreichenden Erfüllungsgrad der Anforderungen erreicht (siehe Abschnitt 6.2.3), wird mit der formalen Definition des anzuwendenden Prognoseverfahrens begonnen (vgl. hierzu die Abschnitte 6.3 bis 6.4). Die exemplarische Anwendung des Prognoseverfahrens findet sich in dem sich anschließenden Kapitel 6.4.3.2.

6.2.1 Anwendung datenbasierter Prognoseverfahren

In dem Abschnitt 4.3 wurde eine Reihe datenbasierter Prognoseverfahren identifiziert. Entsprechend den Schlussfolgerungen aus Abschnitt 4.6 kommen für die Prognose der Straßenverkehrssicherheit Parameterschätzverfahren (vgl. Abschnitt 4.3.2) und künstliche neuronale Netze (vgl. Abschnitt 4.3.3) infrage. Die Verfahren der klassischen Zeitreihenanalyse weisen keine ausreichende Modellkomplexität auf, um den Einfluss von Verkehrssicherheitsmaßnahmen auf die Entwicklung der Verkehrssicherheit abzubilden. Die stochastischen Prognoseverfahren (vgl. Abschnitt 4.3.4) sind zwar prinzipiell für die Fragestellung geeignet, allerdings wird in Anf_14 (siehe S. 87) die Anforderung definiert, dass ausschließlich auf öffentlich verfügbare Unfalldatenbanken zurückgegriffen werden darf. Die erforderliche Unfalldatenmenge für die Parametrierung stochastischer Prognoseverfahren ist damit nicht verfügbar und diese Verfahren entfallen in der Qualifizierung.

Aus dem Bereich der datenbasierten Prognoseverfahren werden folgend verschiedene Grey-Modelle (GM) der Grey Systems Theory (GST) angewendet (vgl. Abschnitte 6.2.1.1 bis 6.2.1.3). Weiterhin werden die Neuronalen Netze zur Prognose der Verkehrssicherheit qualifiziert (vgl. Abschnitt 4.3.3).

6.2.1.1 $GM(1,n)$

Wie in Abschnitt 4.3.2 erläutert, gibt es eine Reihe unterschiedlicher Grau-Modelle. Folgend werden die Grau-Modelle erster Ordnung, sog. $GM(1,n)$, für die Prognose der Verkehrssicherheit qualifiziert. Modelltheoretisch ist hier zwischen zwei Arten der $GM(1,n)$ -Modelle zu unterscheiden: Für GMs mit $n=1$ gilt eine andere mathematische Herleitung als für die übrigen GMs mit $n>1$. Das $GM(1,1)$ bestimmt die Prognose einer Zeitreihe mittels eines Grau-Modells erster Ordnung, vgl. Abbildung 6-2. Es sei hier angenommen, dass alle Informationen zur Bestimmung der zukünftigen Erwartungswerte bereits in der eigentlichen Zeitreihe enthalten sind.

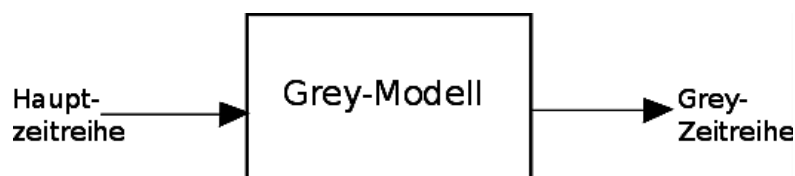


Abbildung 6-2: Blockbild des $GM(1,1)$, in Anlehnung an [Liu u. Lin 2011]

Im Hinblick auf die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 6.1) kann daher bereits ausgeschlossen werden, dass ein $GM(1,1)$ als alleiniges mathematisches Prognosemodell genutzt werden kann, da es nicht in der Lage ist mehrere Zeitreihen in eine Kausalität zu bringen. Dennoch wird die Prognosefähigkeit des Modells im Folgenden qualifiziert:

Sei $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), \dots, x^{(0)}(n))$ eine Reihe von Daten (Originalzeitreihe) mittels derer eine Prognose erfolgen soll und $Z_i^{(1)} = (z_i^{(1)}(1), \dots, z_i^{(1)}(n))$ die kumulierte Originalzeitreihe. Die Modellgleichung für ein $GM(1,1)$ hat dabei folgende Form [Liu u. Lin 2011]:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b. \quad (6.1)$$

Es wird vorausgesetzt, dass die Originalzeitreihe keine negativen oder Nullwerte enthält, andernfalls generiert das Modell ein nicht plausibles Antwortverhalten. Das Gleichungssystem aus 4.2 muss nun gelöst werden, eine ausführliche Herleitung findet sich in [Liu u. Lin 2011]. Die Lösung für das $GM(1,1)$ ergibt sich nun für die Werte für die Neuberechnung der Grau-Zeitreihe $k = 1, 2, \dots, n$ mittels der Formeln:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(1)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a}, \quad \hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k). \quad (6.2)$$

$\hat{x}^{(0)}(k+1)$ liefert die Erwartungswertantwort des Grau-Modells [Liu u. Lin 2011]. Das $GM(1,1)$ ist prognosefähig, da $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ lediglich von dem Index k abhängig ist. Es können daraufhin mehr als n Werte der Originalzeitreihe berechnet werden, indem man für den Index $k = 1, 2, \dots, n + p$ angibt. Hierbei entspricht p der gewünschten Anzahl der Erwartungswerte (Prognosewerte) [Liu u. Lin 2011]. Folgend wird das $GM(1,1)$ auf zwei unterschiedliche Zeitreihen-Arten angewendet. Die erste Zeitreihe beinhaltet die jährlichen Getöteten im deutschen Straßenverkehr (Jahresgang) und die zweite Zeitreihe schlüsselt die Verunglückten im Montagsgang auf. Es soll somit gezeigt werden, mit welcher Art von Zeitreihen-Beschaffenheit (z. B. oszillierend) das Grau-Modell $GM(1,1)$ umgehen kann:

Jahresgang

Grundsätzlich liefert das $GM(1,1)$ bei Jahresgangzeitreihen der Getöteten eine plausible Antwort (vgl. Abbildung 6-3).

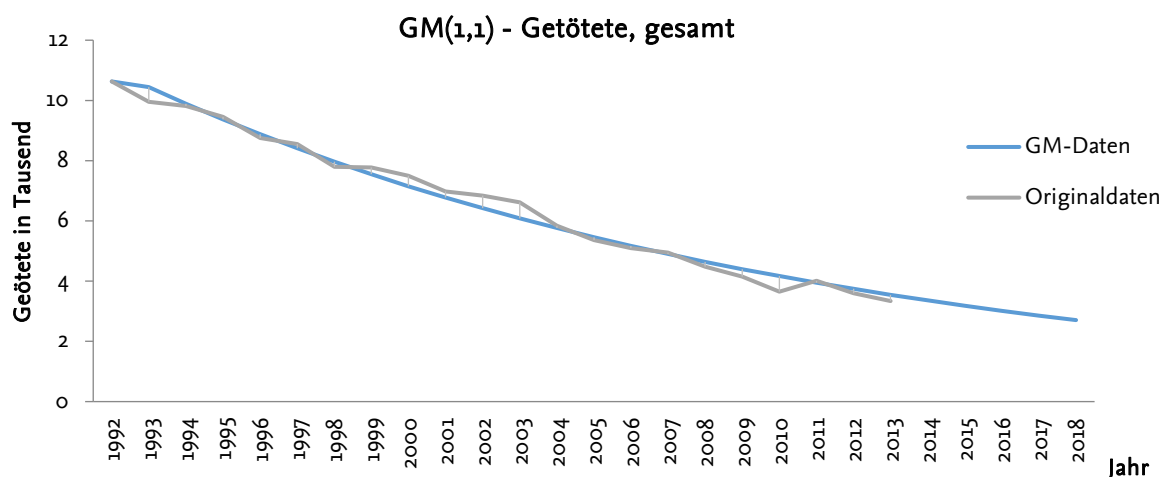


Abbildung 6-3: Qualifizierung des $GM(1,1)$ mit Jahresgang-Zeitreihen

Es ist zu erkennen, dass die Originalzeitreihe leicht schwankt und einen fallenden Trend aufweist. Diesen Trend übernimmt auch das $GM(1,1)$ und bildet auf Basis dessen das erwartete Systemverhalten ab. Das schwankende Systemverhalten bildet das $GM(1,1)$ nicht ab. Es lässt sich daher schlussfolgern, dass das $GM(1,1)$ für relativ monotone Datenverläufe geeignet ist und zumindest den grundlegenden Trend einer Zeitreihe wiedergeben kann.

Monatsgang

Entgegen dem Ergebnis der vorhergehenden Betrachtung von Jahresgang-Zeitreihen mit wenig schwingendem Verhalten kann das $GM(1,1)$ kein plausibles Systemverhalten für Monatsgang-Zeitreihen mit oszillierendem Charakter herstellen. Die an das $GM(1,1)$ gegebene Monatsgang-Zeitreihe der Getöteten auf Autobahnen und außerorts hat einen stark periodisch schwingenden Charakter. Der Verlauf der Grau-Modell-Antwort und der Originalzeitreihe sind dabei massiv unterschiedlich (vgl. Abbildung 6-4). Das Grau-Modell hat zwar mit der wesentlich höheren Anzahl an Input-Daten im Vergleich zum Jahresgang keine Probleme, das oszillierende Verhalten kann allerdings nicht abgebildet werden. Die im $GM(1,1)$ enthaltene Modell-Gleichung ist daher nicht geeignet und zu einfach, als dass schwankende Zeitreihen abgebildet werden können.

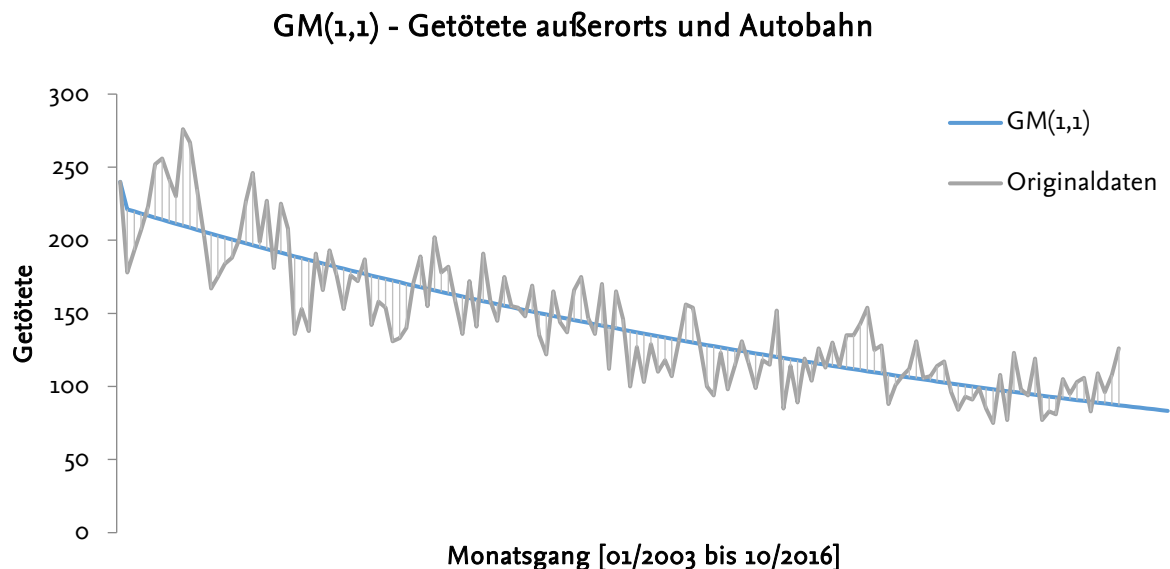


Abbildung 6-4: Qualifizierung des $GM(1,1)$ mit Monatsgang-Zeitreihen

Die Grau-Modelle für $n > 1$ können neben der Hauptzeitreihe (Originalzeitreihe) noch weitere Zeitreihen, sog. Nebenzitreihen, an das Modell geben, vgl. Abbildung 6-5. Damit ist das Modell von seinem Modellkonzept her geeignet, weitere kausale Zeitreihen miteinander in Verbindung zu bringen.

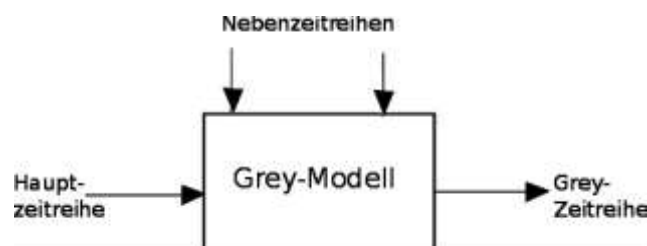


Abbildung 6-5: Blockbild des $GM(1,N)$, in Anlehnung an [Liu u. Lin 2011]

Für das Grau-Modell $GM(1,n)$ mit $n > 1$ ergibt sich daher die Form:

$$x_1^{(0)}(k) + az_1^{(1)}(k) = \sum_{j=2}^N b_j x_j^{(1)}(k) \quad (6.3)$$

Hierbei ist a der Entwicklungskoeffizient und b_j definiert die einzelnen Grau-Faktoren. Entsprechend dem Vorgehen der Lösung des Gleichungssystems $GM(1,1)$ wird ebenfalls das Gleichungssystem für $GM(1,n)$ gelöst, vgl. hier [Liu u. Lin 2011]. Als Ergebnis für das $GM(1,n)$ ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x_1^{(1)}(0) - \frac{1}{a} \sum_{j=2}^N b_j x_j^{(1)}(k+1))e^{at} + \frac{1}{a} \sum_{j=2}^N b_j x_j^{(1)}(k+1), \quad (6.4)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k). \quad (6.5)$$

Die Grau-Zeitreihe berechnet sich nun entsprechend den Gleichungen 4.5 und 4.6 [Liu u. Lin 2011]. Allerdings zeigt bereits das Gleichungssystem selbst, dass dieses Grau-Modell nicht prognosefähig ist: Die in der Gleichung $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 4.6 bestehenden Werte für x_j der Originalzeitreihe müssen an das Grau-Modell gegeben werden, um neue Grau-Werte zu erhalten. Das $GM(1,n)$ -Modell ist daher von seinen Input-Daten abhängig und liefert nicht selbstständig prognostische Daten. Eine exemplarische Anwendung findet sich im Anhang A. Es wird hier gezeigt, dass das Modell zwar mehrere Zeitreihen als Input verarbeiten kann, gleichzeitig aber nur eine Zeitreihe als Output geliefert wird. Die Zeitreihe zeigt kein plausibles Systemverhalten. Daher kann das $GM(1,n)$ mit $n>1$ als nicht nutzbar qualifiziert werden. Nachdem das $GM(1,1)$ für bestimmte Anwendungsfälle qualifiziert erscheint, wird im Folgenden das $GM(2,n)$ qualifiziert.

6.2.1.2 $GM(2,n)$

Wie bereits das $GM(1,n)$ unterscheidet sich das $GM(2,n)$ ebenfalls zwischen Modellen mit $n=1$ und $n>1$. Es kann vorweg genommen werden, dass wie schon beim $GM(1,n)$, $n>1$ die Grau-Modelle wieder vom Input abhängig sind und keine Prognoseaussage treffen können [Liu u. Lin 2011]. Eine exemplarische Anwendung ist im Anhang B ergänzt. Daher wird folgend das $GM(2,1)$ für je einen Monats- und Jahresgang betrachtet. Da nur ein $GM(2,1)$ prognosefähig ist, kann ebenfalls wie beim $GM(1,1)$ nicht die Korrelation zu weiteren Zeitreihen hergestellt werden. Daher wird das Modell nur bedingt für die Prognose der Verkehrssicherheit geeignet sein. Die grundlegende Modellgleichung für das $GM(2,1)$ lautet nach [Liu u. Lin 2011]:

$$\alpha^{(1)}x^{(0)}(k) + a_1x^{(0)} + a_2z^{(1)}(k) = b. \quad (6.6)$$

Dabei wird der Faktor α entsprechend dem allgemeinen $GM(r,n)$ definiert. Es wird davon ausgegangen, dass die Inputwerte nur positive Zahlenwerte aufweisen, daher fallen Variationen des $GM(2,1)$ nach [Liu u. Lin 2011] heraus. Das Gleichungssystem für das Grau-Modell (vgl. [Liu u. Lin 2011]) wird gelöst und ergibt sich zu folgenden formalen Ausdrücken [Hai 2015]:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} = \bar{X}^{(1)}(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (6.7)$$

$$\hat{x}^{(1)}(t) = \lambda_1 C_1 e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 C_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (6.8)$$

Mittels Lösung der Konstanten C_1 und C_2 kann das Grau-Modell bestimmt werden. Das GM(2,1) ist demnach in der Lage eine Prognose zu treffen, da $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ lediglich von dem Index k abhängig ist und nicht die Input-Werte benötigt [Liu u. Lin 2011]. Folgend wird das GM(2,1) an Zeitreihen des Verkehrs im Jahresgang und Monatsgang qualifiziert:

Jahresgang

Analog zum qualifizierten GM(1,1) wird die Zeitreihe der Getöteten im Straßenverkehr an das GM(2,1) gegeben. Sind Ähnlichkeiten zum GM(1,1) erkennbar, so wird der Trend der Originalzeitreihe wiedergegeben, vgl. Abbildung 6-6.

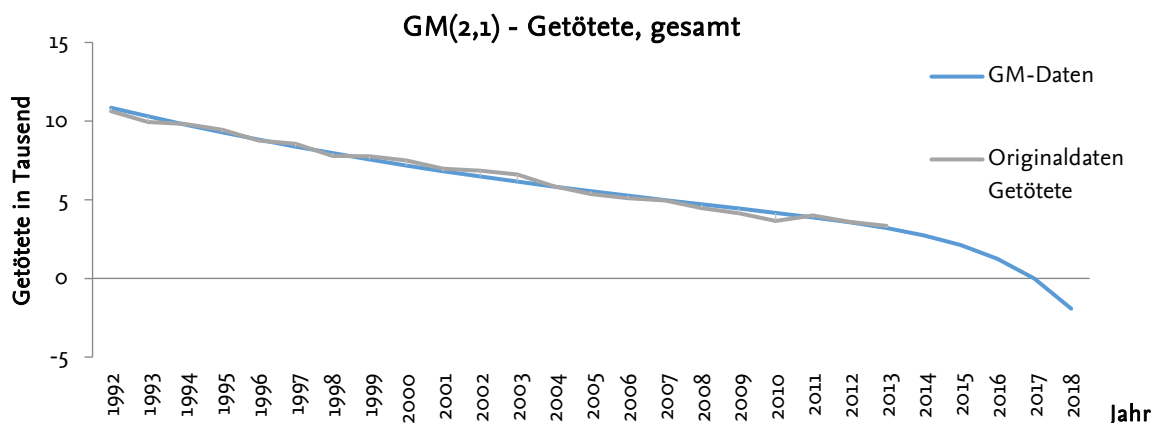


Abbildung 6-6: Qualifizierung des GM(2,1) mit Jahresgang-Zeitreihen

Die vom GM(2,1) ermittelten Erwartungswerte der Originalzeitreihe weichen wiederum stark vom GM(1,1) ab: Demnach sinken nach 2014 (Ende der Originalzeitreihe) die Verkehrstoten bis 2018 auf null und nehmen schließlich negative Werte an. Das GM(2,1) ist folglich in der Lage den Verlauf der Originalzeitreihe hinreichend wiederzugeben, allerdings ist die Prognose als nicht plausibel einzustufen. Das Modell GM(2,1) kann nicht verwendet werden.

Monatsgang

Ebenfalls analog zum GM(1,1) wird eine Zeitreihe im Monatsgang an das GM(2,1) gegeben (vgl. Abbildung 6-7).

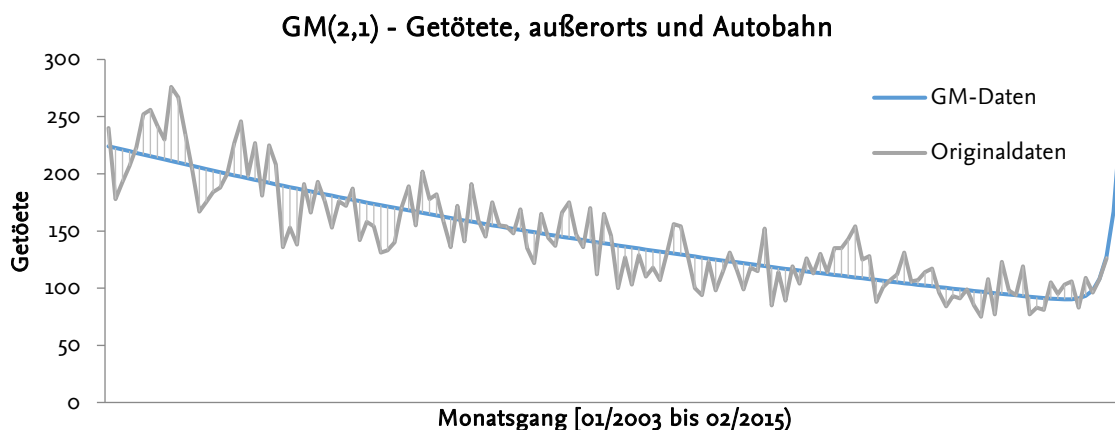


Abbildung 6-7: Qualifizierung des GM(2,1) mit Monatsgang-Zeitreihen

Wie bereits das $GM(1,1)$ kann auch das $GM(2,1)$ das oszillierende Verhalten der Daten nicht wiedergeben, hat aber keine Schwierigkeiten mit der Menge an Input-Daten umzugehen. Das Modell ist weiterhin für die Prognose aus mathematischer Sicht geeignet, der starke Anstieg zum Ende der Zeitreihe zeigt eine nicht plausible Antwort des Grau-Modells auf die Originalzeitreihe. Das $GM(2,1)$ kann nicht für die Vorhersage der Verkehrssicherheit mit Monatsgangzeitreihen verwendet werden.

6.2.1.3 $MGM(1,n)$

Neben den Grau-Modellen erster und zweiter Ordnung soll hier eine weitere Variation der Grau-Modelle qualifiziert werden. [Liu u. Lin 2011] verweisen auf eine Reihe weiterer Grau-Modell-Variationen, es wird hier davon abgesehen alle Variationen auszutesten, sondern nur solche, denen eine grundlegende Prognosefähigkeit beigemessen wird.

Eines dieser prognosefähigen Modelle stellt das $MGM(1,n)$ dar: das erweiterte Grau-Modell erster Ordnung. Das $MGM(1,n)$ hat wie bereits das $GM(1,n)$ die Möglichkeit mehrere Zeitreihen zu verarbeiten, allerdings werden die weiteren Zeitreihen nicht als Nebenzeitreihen an das Modell gegeben, sondern das $MGM(1,n)$ kann gleichzeitig eine Prognose aller an das Modell gegebenen Zeitreihen bereitstellen, vgl. Abbildung 6-8.

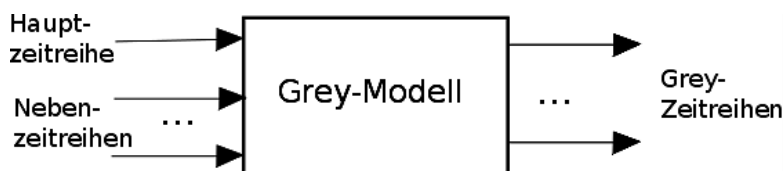


Abbildung 6-8: Blockbild des $MGM(1,n)$

Auch in diesem Modell werden durch $X_i^{(0)}$ die einzelnen Originalzeitreihen definiert. Die Erweiterung des Grau-Modells drückt sich durch die b_i aus. Das zu lösende Gleichungssystem für das $MGM(1,n)$ ist wie folgt definiert [Hui et al. 2013: 2909f.]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1^{(1)}(t)}{dt} &= a_{11}x_1^{(1)} + a_{12}x_2^{(1)} + \dots + a_{1N}x_N^{(1)} + b_1 \\ &\dots \\ \frac{dx_N^{(1)}(t)}{dt} &= a_{N1}x_1^{(1)} + a_{N2}x_2^{(1)} + \dots + a_{NN}x_N^{(1)} + b_N. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Entsprechend [Liu u. Lin 2011] ist das Ergebnis des Gleichungssystems:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = e^{\hat{A}(k-1)}X^{(1)}(1) + \hat{A}^{-1}(e^{\hat{A}(k-1)} - I)\hat{B}, \quad (6.10)$$

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k), \quad (6.11)$$

wobei sich mit I die Einheitsmatrix definiert und \hat{X} , \hat{A} und \hat{B} die Lösungen des Gleichungssystems angeben [Hui et.al. 2013]. Mit den Gleichungen 4.11 und 4.12 lassen sich die Grau-Zeitreihen berechnen. Diese sind erneut unabhängig von den Originalzeitreihenwerten x_i und daher prognosefähig, da sie nur vom Index k abhängig sind. Folgend wird das $MGM(1,n)$ für einen Jahresgang und einen Montagsgang mit drei Zeitreihen als Input genutzt.

Jahresgang

An das $\text{MGM}(1,3)$ werden die Zeitreihen der jährlichen Getöteten, Schwer- und Leichtverletzten gegeben. Das Antwortverhalten des $\text{MGM}(1,3)$ scheint vergleichbar dem $\text{GM}(1,1)$. Die leichten Schwankungen werden nicht wiedergegeben, wobei das $\text{MGM}(1,3)$ gut den Trend wiedergibt und in die Zukunft prognostiziert. Ein Vergleich der Ergebniswerte der Grau-Modelle $\text{GM}(1,1)$ und $\text{MGM}(1,3)$ zeigen, dass die Grey-Zeitreihe des $\text{MGM}(1,3)$ ein wenig unter den Werten des $\text{GM}(1,1)$ liegt, also eine positivere Entwicklung der Verkehrssicherheit vorhersagt (vgl. Abbildung 6-9).

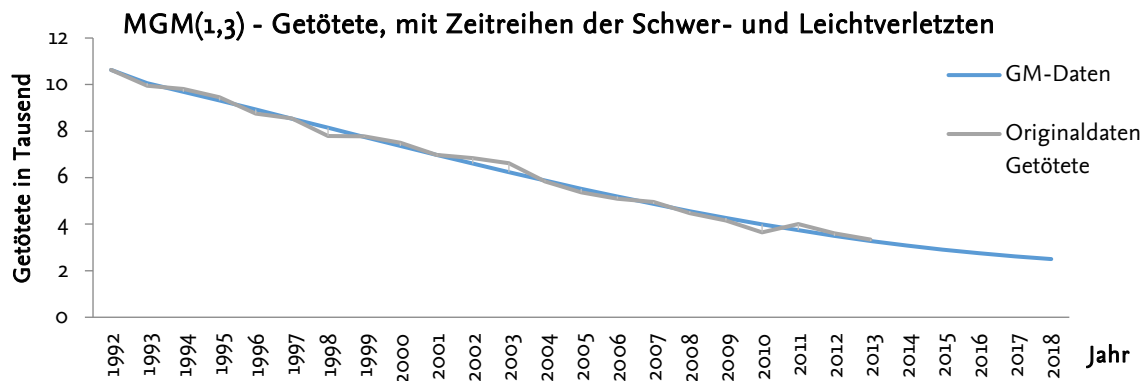


Abbildung 6-9: Qualifizierung des $\text{MGM}(1,3)$ mit Jahresgang-Zeitreihen

Dies mag an dem generellen Trend liegen, dass die Unfallschweren sich kontinuierlich zu den leichteren Unfallschweren verschieben (vgl. Abschnitt 1.1). Folglich lassen sich mit dem $\text{MGM}(1,n)$ Prognosen erstellen, in denen der Trend der eingegebenen Daten aufgegriffen und nachgebildet wird. Von Vorteil ist hierbei, dass mehrere Zeitreihen an das Modell gegeben werden und das Modell selbstständig einen kausalen Zusammenhang erkennt.

Monatsgang

Zwecks Qualifizierung des $\text{MGM}(1,n)$ mit Monatsgang-Zeitreihen, werden exemplarisch zwei Zeitreihen an das $\text{MGM}(1,2)$ gegeben: Neben der primären Zeitreihe zu den Getöteten im PKW wird weiterhin eine Nebenzeitreihe mit den Getöteten auf Autobahnen an das Modell gegeben. Wie auch schon die $\text{GM}(1,1)$ und $\text{GM}(2,1)$ kann das $\text{MGM}(1,n)$ offensichtlich nicht mit oszillierenden Datenreihen umgehen, vgl. Abbildung 6-10. Der Trend kann weiterhin durch das $\text{MGM}(1,2)$ abgebildet werden. Das $\text{MGM}(1,n)$ scheint daher nicht geeignet zu sein für die Prognose von Zeitreihen mit einem schwankenden Charakter.

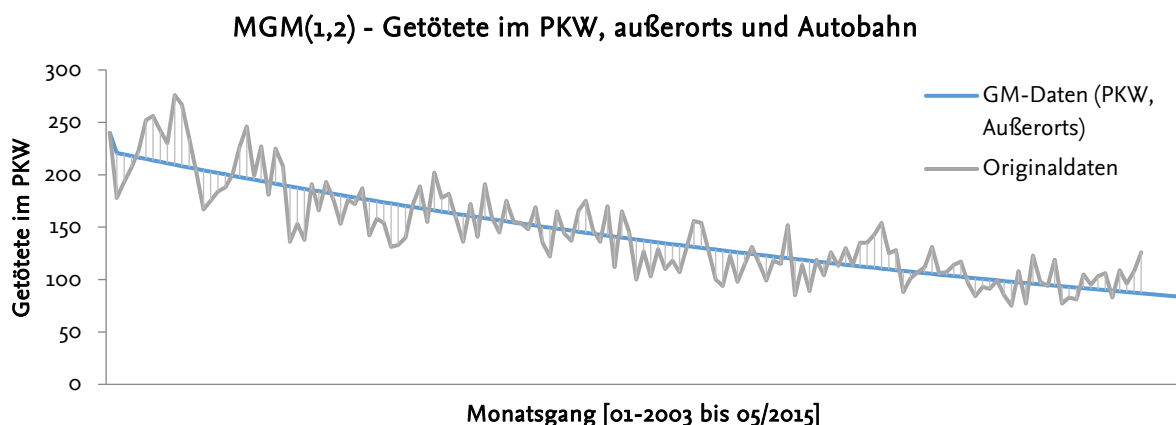


Abbildung 6-10: Qualifizierung des $\text{MGM}(1,2)$ mit Montagsgang-Zeitreihen

Nachdem nun die relevanten Grey-Modelle exemplarisch angewendet worden sind, kann im Folgenden das Verfahren der neuronalen Netze angewendet und qualifiziert werden.

6.2.1.4 Neuronale Netzwerke (NN)

Da es sich bei dem Verfahren der neuronalen Netzwerke (NN) um nichtlineare Systeme handelt, ist die Ergebnisqualität entscheidend von der Netzwerktopologie, den charakteristischen Gewichtungen der Neuronen und den angewendeten Lernalgorithmen abhängig (siehe auch Abschnitt 4.3.3). Weiterhin hängt die Ergebnisqualität eines neuronalen Netzes von den gewählten Input-Größen ab, nur wenn diese korrekt ausgewählt wurden und tatsächlich einen kausalen Zusammenhang aufweisen, kann auch das Netz eine sinnvolle Struktur erkennen. Zumeist sind die gebildeten Gewichtungen und Schwellenwerte der Hidden-Layers unverständlich, da mittels der Trainingsphase ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Netzes hergestellt wird [Wang et.al. 2003] [Lu et. al. 2001]. Erst durch strukturierte Variationen der Netzwerktopologie, den Gewichtungen und der Anwendung der Lernalgorithmen wird ein plausibles Ergebnis erzielt. Die Anwendung neuronaler Netzwerke ist daher stark abhängig von der Erfahrung des Anwenders. Oftmals werden gute neuronale Netzwerke erst erzeugt, wenn eine Reihe von qualifizierenden Experimenten erfolgt [Hornik et.al. 1989] [Baum u. Haussler 1989].

Die benannten Schwierigkeiten bei der Modellierung neuronaler Netze können relativ einfach für die Anwendung verkehrlicher Fragestellungen aufgezeigt werden: Im Zuge dessen werden im Folgenden sog. NARX-Zeitreihen (non-linear auto regressive) mit mind. zwei Input-Werten betrachtet (vgl. Abbildung 6-11). Zu viele Neuronen führen dabei zu einem verzerrten Ergebnis, wohingegen zu wenige zu Abweichungen von den Originalzeitreihen führen. Nachdem eine Netztopologie vordefiniert wird, kann durch verschiedene Trainingsdurchläufe das Netz angelernet werden. Je nach gewähltem Trainingsalgorithmus (z. B. Scaled Conjugate Gradient, Bayesian Regularization, Levenberg-Marquardt) liefert das Netz unterschiedliche Ergebnisse, vgl. hierzu die im Anhang C bereitgestellten exemplarischen Anwendungen unterschiedlicher Trainingsalgorithmen. In Abbildung 6-11 sind exemplarische Ergebnisse unterschiedlicher Trainingsdurchläufe des vordefinierten neuronalen Netzes mit fünf Neuronen im Input-Layer, zehn Neuronen im Hidden-Layer und einer Neurone im Output-Layer aufgezeigt.

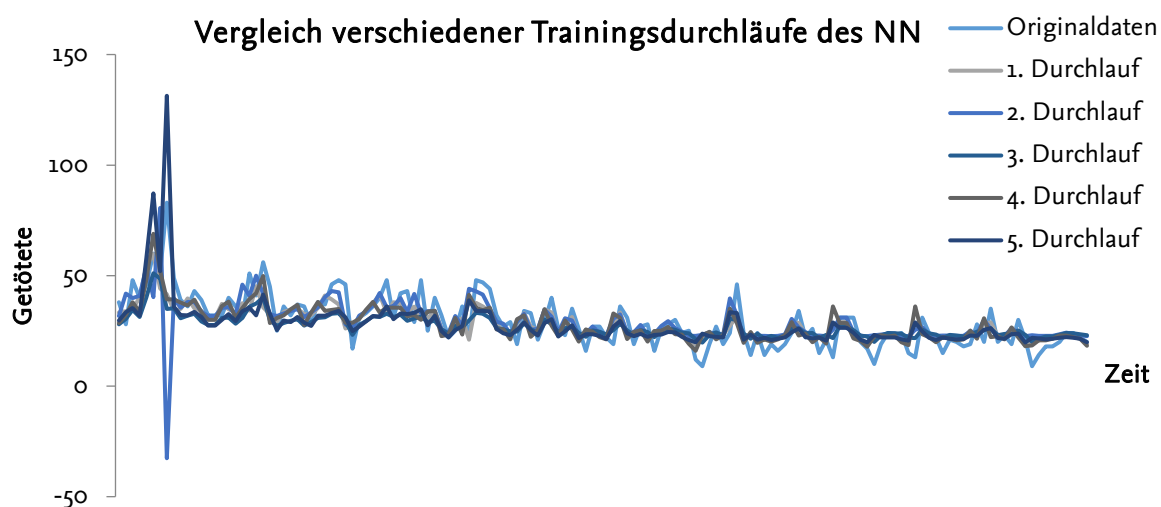


Abbildung 6-11: Vergleich verschiedener Trainingsergebnisse einer NN-basierten VS-Prognose

Hier zeigt sich, dass sich z. T. deutliche Abweichungen von der Originalzeitreihe in den Anfangsphasen der Simulation ergeben. Im späteren Simulationsverlauf werden die Antworten des Neuronalen Netzes genauer.

Die relevanten datenbasierten Prognoseverfahren sind nun ausreichend für die Qualifizierung angewendet worden. Der nächste Abschnitt befasst sich mit der Anwendung der relevanten modellbasierten Prognoseverfahren.

6.2.2 Anwendung modellbasierter Prognoseverfahren

In dem Abschnitt 4.4 wurden modellbasierte Verfahren identifiziert, worunter systemtheoretische und hybride Verfahren summiert sind. Entsprechend den Schlussfolgerungen aus Abschnitt 4.6 kommt für die Prognose der Straßenverkehrssicherheit das Verfahren System Dynamics (siehe Abschnitt 4.4.1) infrage. Weiterhin wurde in den Schlussfolgerungen festgestellt, dass insb. die Kombination zwischen datenbasierten und modellbasierten Prognoseverfahren als leistungsfähig einzustufen ist, da die individuellen Vorteile der Prognoseverfahren und zugrundeliegenden Modellkonzepte miteinander kombiniert werden können (vgl. Abschnitt 4.4.2 und 4.6).

Aus dem Bereich der modellbasierten Prognoseverfahren werden folgend der System Dynamics-Ansatz (siehe Abschnitt 4.4.1) sowie zwei hybride Verfahren exemplarisch angewendet. Bei den hybriden Verfahren wird zuerst eine Hybridisierung zwischen neuronalen Netzen und genetischen Algorithmen (NN-GA) in Abschnitt 6.2.2.2 vorgenommen und abschließend noch das Verfahren System Dynamics mit einem Modell der Grey Systems Theory in Abschnitt 6.2.2.3 qualifiziert.

6.2.2.1 System Dynamics (SD)

Im Folgenden wird der Ansatz System Dynamics nach [Forrester 1989] exemplarisch für die Fragestellung angewendet. Das Vorgehen der SD-Modellierung orientiert sich dabei an dem von [Sterman 2004] definierten Vorgehen der Modellerstellung. Demnach wird zuerst die sog. dynamische Hypothese des Systems aufgestellt, welche daraufhin im sog. Kausalschleifendiagramm quantifiziert wird. Das System Dynamics Modell wird anschließend einer Simulation unterzogen und eine Sensitivitätsanalyse der Parametrierung vorgenommen.

Aufbau des Kausalschleifendiagramms (Dynamische Hypothese)

Die dem System Modell der Verkehrssicherheitsprognose zugrundeliegende dynamische Hypothese wurde bereits im Abschnitt 5.4 dargestellt und nutzt ein Sicherheitsmodellkonzept (vgl. Abschnitt 5.2.3): Die zugrundeliegende dynamische Hypothese besagt demnach, dass die Zahl Getöteter im Straßenverkehr primär von der zunehmenden Zahl von Maßnahmen beeinflusst wird. Demnach führt das Unfallaufkommen zur Ergreifung weiterer Maßnahmen und mindert damit die Unfallschweren. Der Sicherheitsgewinn einer Maßnahme ist dabei vom Systempenetrationsgrad abhängig und von der Menge an relevanten Unfällen, die mit der Maßnahme adressiert werden (vgl. Abschnitt 1.5). Nachdem die dynamische Hypothese der Verkehrssicherheit im Kausalschleifendiagramm in Abbildung 5-7 formuliert ist, erfolgt die Quantifizierung.

Aufbau des Lager-Fluss-Diagramms (Modell-Quantifizierung)

Um das zu entwickelnde System Dynamics ausreichend einfach für die Qualifizierung zu gestalten, wird im Folgenden ein Lager-Fluss-Diagramm aufgebaut, welches nur Fahrerassistenzsysteme in den Verkehrsmitteln als Verkehrssicherheitsmaßnahme eruiert. Sollte sich das Verfahren System Dynamics als ausreichend qualifizieren, werden in der Modellentwicklung (siehe Abschnitt 6.4) weitere Maßnahmen modelliert.

Die Zielsetzung der Modell-Quantifizierung stellt die Übertragung der dynamischen Hypothese in ein physikalisch fassbares Modell dar. Entscheidend hierbei ist die korrekte Differenzierung zwischen endogenen und exogenen Variablen im Lager-Fluss-Diagramm. Bei dem hier entwickelten Modell wird sich auf die Vorarbeiten von [Minami u. Madnick 2010] gestützt. Die Erweiterung des Modells ergibt folgendes simulierbares Lager-Fluss-Diagramm:

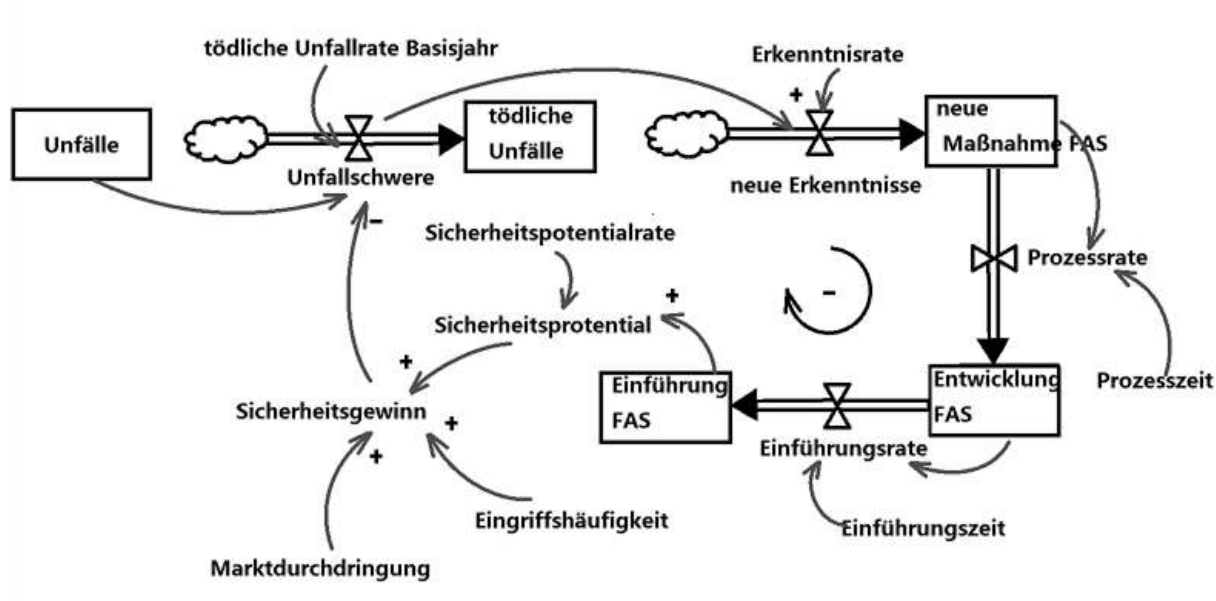


Abbildung 6-12: Quantisiertes Lager-Fluss-Diagramm der Verkehrssicherheitsprognose, in Anlehnung an [Brockschnieder 2014]

Es sind in dem in Abbildung 6-12 gezeigten Lager-Fluss-Diagramm bereits die zentralen Aspekte der Modellkonzeption zu erkennen: Die Wirkung bestimmt sich durch die Faktoren Sicherheitspotential, Eingriffshäufigkeit (Wirkfeld) und der Marktdurchdringung; die Verkehrssicherheitsprognose stellt einen kausalen Zusammenhang zu den Maßnahmen her. Die Marktdurchdringung wird im Lager-Fluss-Diagramm mittels eines Bass-Diffusionsmodells realisiert, um so möglichst plausibel die Durchdringung im Verkehrssystem abzubilden [Wansart u. Schnieder 2008]. Das vollständige Modell kann dem Anhang D entnommen werden.

Simulation des System Dynamics Modells

Die Ergebnisse des entwickelten System Dynamics Modells aus Abbildung 6-12 sind als kumulierte Kurve im Vergleich zur Originalzeitreihe in Abbildung 6-13 bereitgestellt, vgl. [Brock-schnieder 2014]. Das Modell zeigt hier eine Abweichung von 2,58% zur Originalzeitreihe und erreicht eine hinreichende Erwartungswertprognose.

Wie auch schon bei den Grau-Modellen ergibt sich der Fehler primär durch die fehlende Abbildbarkeit der Oszillation des Realsystems. Es ist zu erwarten, dass die Schwingung durch ein verfeinertes System Dynamics Modell nachgebildet werden kann. Im Sinne des Vorgehens nach

[Sterman 2004] und den Anforderungen (vgl. Abschnitt 6.1) an das zu entwickelnde Prognosemodell, müssen vertrauensbildende Maßnahmen ergriffen werden. Für das System Dynamics Modell kann dies mittels der Sensitivitätsanalyse anhand verschiedener Szenarien durchgeführt werden. Dies wird exemplarisch im folgenden Abschnitt durchgeführt.

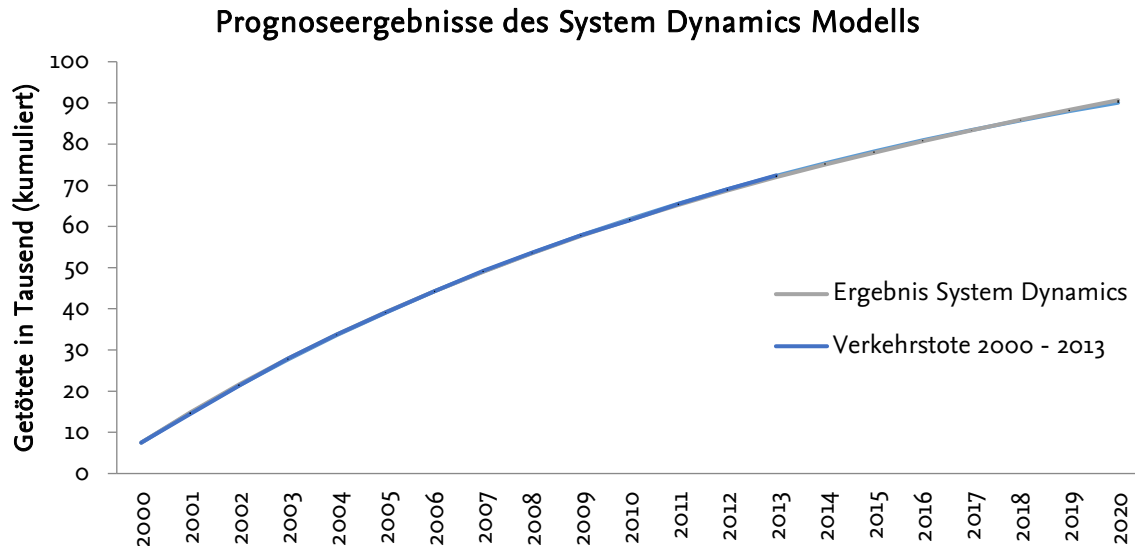


Abbildung 6-13: Vergleich der Simulationsergebnisse in kumulierter Darstellung

Sensitivitätsanalyse

Durch gezielte Variation der exogenen Variablen des System Dynamics Modells (z. B. Einführungszeit einer Maßnahme, Marktdurchdringungsrate, etc.) kann das Verhalten des Systems auf den Modell-Output, hier der Verkehrssicherheit, analysiert werden. Im Rahmen dieser Qualifizierung soll eine Variation (hier: V_n) der exogenen Parameter erfolgen, vgl. Tabelle 6-6. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-14 dargestellt.

Tabelle 6-6: Variation der exogenen Modell-Parameter

<i>Szenario</i>	V_0^8	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
<i>Prozesszeit [Jahre]</i>	7,00	7,00	7,00	7,00	5,00	5,00
<i>Einführungszeit [Jahre]</i>	7,00	7,00	7,00	7,00	5,00	5,00
<i>Sicherheitspotentialrate [dmnl]</i>	0,55	1,10	0,55	0,55	0,55	1,10
<i>Eintrittshäufigkeit [dmnl]</i>	0,36	0,36	0,72	0,36	0,36	0,36
<i>Marktdurchdringung [Jahre]</i>	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass das Modell signifikant auf die veränderten exogenen Variablen reagiert und daher aus zwei Gründen nicht für die Zielsetzung dieser Arbeit angewendet werden kann:

⁸ Parameter des Ausgangsszenarios.

- Die Parametervariationen 1 bis 5 liefern eine grundsätzliche Verbesserung der Verkehrssicherheit ab Simulationsbeginn (Basisjahr 2000)
- Die Effekte der Parametervariation wirken am Simulationsbeginn. Das Modell ist demnach nicht in der Lage den historischen Verlauf der Zeitreihe abzubilden.

Sensitivitätsanalyse des System Dynamics Modells

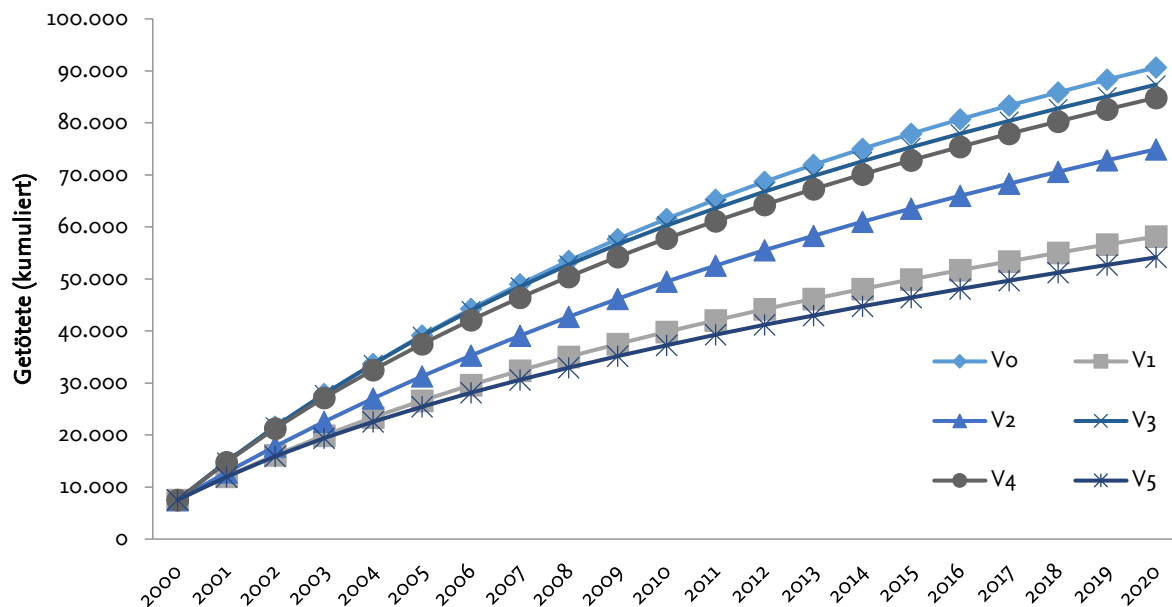


Abbildung 6-14: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Das hier erstellte System Dynamics Modell sieht aktuell eine reine Modellierung mit den in System Dynamics vorhandenen Modellierungsprinzipien nach [Sterman 2004] vor. In den Arbeiten von [Wansart 2012] und [Kieckhäfer 2013] sind Hybridisierungen des System Dynamics-Ansatzes mit der Discrete Choice-Theorie und Ansätzen der Agentensimulation durchgeführt worden. Hier zeigt insbesondere die Verwendung unterschiedlicher Modellkonzepte ein plausibleres Verhalten. Allerdings fokussieren die Arbeiten von [Wansart 2012] und [Kieckhäfer 2013] die Auswirkungen einer Gesetzesänderung auf das Absatzverhalten von Neufahrzeugen. Wie bereits erwähnt, wird äquivalent dem methodischen Vorgehen in den Arbeiten von [Wansart 2012] und [Kieckhäfer 2013] eine Hybridisierung des System Dynamics Ansatzes exemplarisch vorgenommen, siehe Abschnitt 6.2.2.3. Folgend wird zuerst ein hybrides Verfahren für neuronale Netze angewendet.

6.2.2.2 NN-GA

Um den inhärenten Schwierigkeiten von neuronalen Netzen eine methodisch fundierte Lösung zu bieten (vgl. Abschnitt 4.3.3), gibt es mittlerweile verschiedene Ansätze. Die Arbeiten von [Zhou et.al. 2000] schlagen eine Reihe von neuen neuronalen Netzwerkmodellen vor, welche die Netzwerkleistung insbesondere aus der Sicht der Netzwerktopologie untersucht. Ein vielversprechender Lösungsansatz scheint hier ein „hybrider“ Ansatz zu sein: Durch Integration neuronaler Netze mit weiteren mathematischen Optimierungsverfahren (vgl. Abbildung 6-15) kann die Ergebnisqualität deutlich verbessert werden [Ahmadizar 2015].

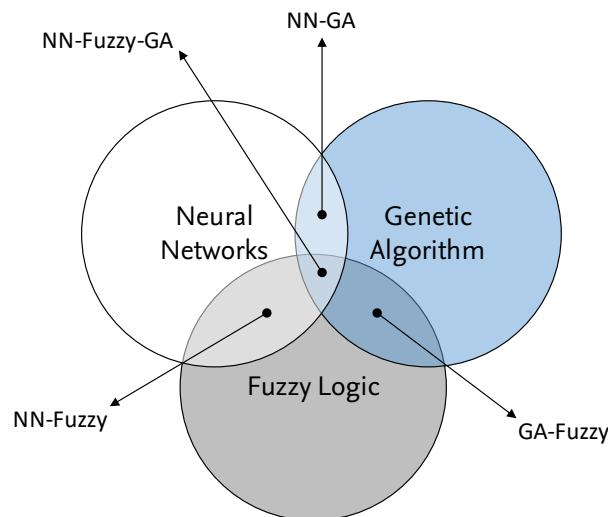


Abbildung 6-15: Integration Neuronaler Netze, Genetischer Algorithmen und Fuzzy-Logik [Ahmadizar 2015]

Aus dem Forschungsbereich der Integration zwischen neuronalen Netzen und genetischen Algorithmen (NN-GA) hat sich das Verfahren der GABP-Netze (genetic algorithm back propagation) herausgebildet. Dieser Ansatz basiert darauf, dass die Gewichtungen und Schwellenwerte als Chromosomen beschrieben werden können und eine entsprechende Fitness-Funktion bestimmt werden kann, vgl. den beschriebenen Prozess in Abbildung 6-16 [Belew u. Booker 1991] [Wang et.al. 2003].

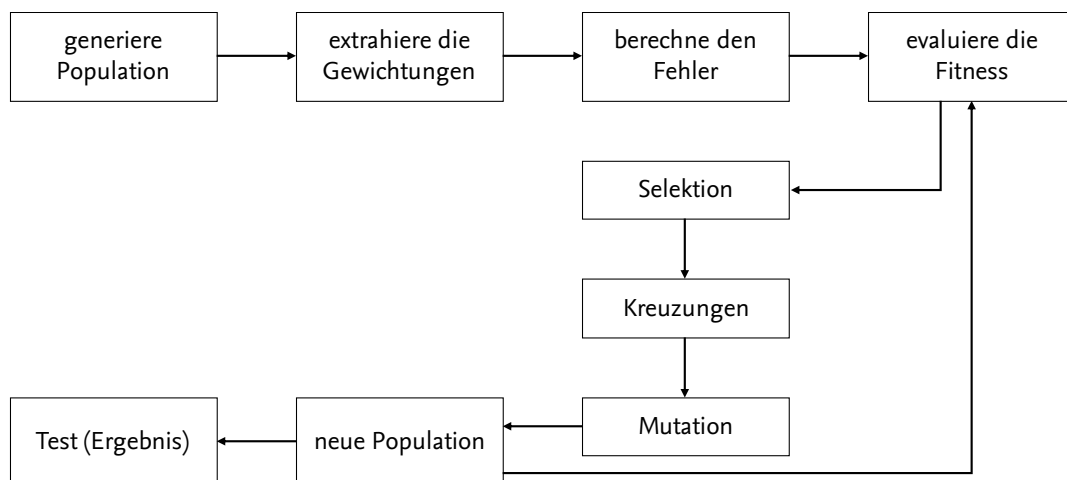


Abbildung 6-16: Prozess des GABP-Verfahrens, in Anlehnung an [Ahmadizar 2015]

Der Ansatz der genetischen Algorithmen mimt die natürliche Selektion des „Random Search“-Algorithmus nach. Anfangs lag die Zielsetzung darin, natürliche Prozesse mathematisch nachzubilden. Heutzutage werden genetische Algorithmen als ein zielführendes Instrument zur Problemlösung und Optimierung angesehen [Huang 2015]. Durch die Kombination aus neuronalen Netzen und genetischen Algorithmen kann die Abhängigkeit von der Erfahrung des Anwenders in ein mathematisches Optimierungsproblem überführt werden und so gezielt die Netzwerktopologie, die Gewichtungen und Schwellenwerte sowie die Lernalgorithmen optimal der avisierten Fragestellung angepasst werden [Mühlenbein 1990] [Wang et.al. 2003] [Judd 1987]. Eine exemplarische Anwendung eines GABP-Netzes für die Prognose der Getöteten im Monatsgang wird in der folgenden Abbildung 6-17 gezeigt.

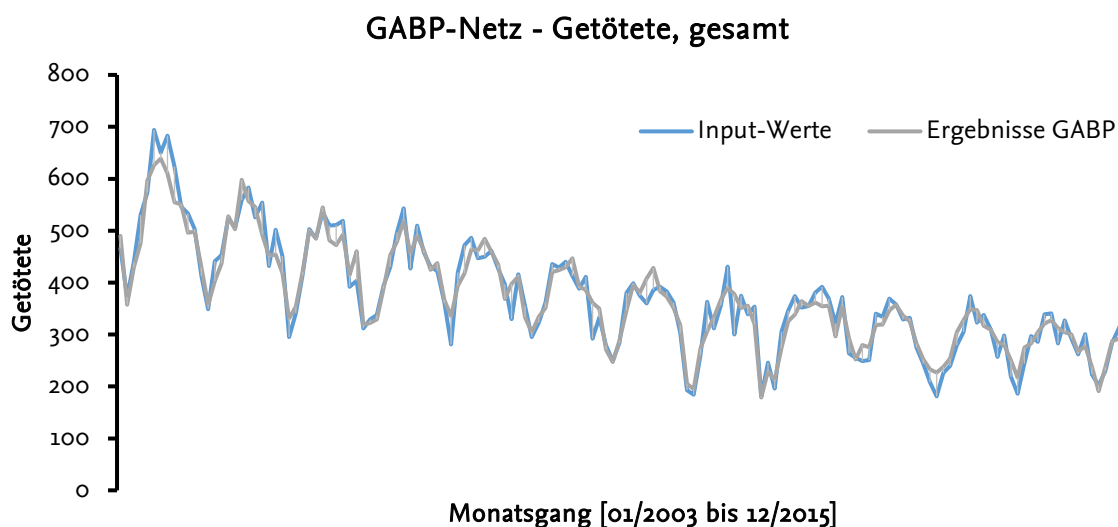


Abbildung 6-17: Vergleich zwischen Rohdaten und den Ergebnissen von NN

Es ist zu erkennen, dass das GABP-Netz hier eine geringe Abweichung von der Originalzeitreihe aufweist. Der genaue Fehlerwert kann z. B. durch die Bestimmung der mittleren quadratischen Fehler bestimmt werden. Da es sich um ein Backpropagations-Netz handelt, kann auf Basis der Originalzeitreihe selbst eine Prognose erstellt werden. Wie im Abschnitt 4.3.3 erläutert, greift daraufhin das Netz selbst als Prädiktorvariable auf die vergangenen Daten der Originalzeitreihe zurück. Dies ist hier nur bedingt sinnvoll, da im Sinne der Anforderungen (Abschnitt 6.1) nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine einzelne Zeitreihe alle erforderlichen Informationen zur Fortschreibung der Zeitreihe enthält. Dennoch zeigen die Prognoseergebnisse in Abbildung 6-18 ein plausibles Systemverhalten (für den Prognosehorizont von 27 Monaten) und bilden das typische oszillierende Verhalten des Verkehrssystems ab.

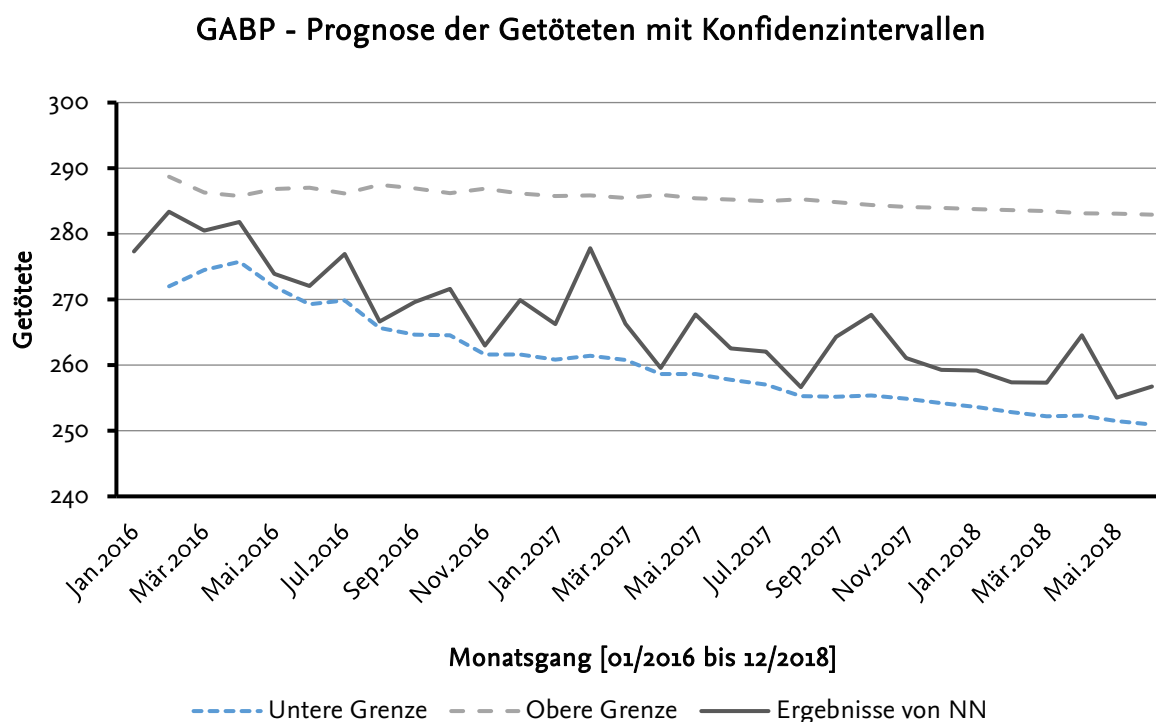


Abbildung 6-18: Ergebnisse der GABP Prognose

6.2.2.3 SD-GST

Wie in Abschnitt 6.2.2 gezeigt werden konnte, bietet der Ansatz System Dynamics offensichtliche Vorteile, soweit ein grundlegendes Systemverständnis vorhanden ist. Da dieses Systemverständnis allerdings entsprechend den Anforderungen (vgl. Abschnitt 6.1) nicht nachweislich für alle Elemente des Verkehrssystems vorliegt, wird folgend eine Hybridisierung aus System Dynamics und einem Grau-Modell vorgestellt.

Das Modellkonzept der konkreten Hybridisierung ist in Abbildung 6-19 dargestellt. Die Zielsetzung ist hierbei mit Hilfe von System Dynamics die Anteile des Verkehrssystems zu modellieren, über die vollständige Informationen vorliegen. Der Anteil des Systems, welcher sich dem nachweislichen Verständnis entzieht, wird mittels eines Grau-Modells modelliert, welches selbstständig in der Lage ist, auf Basis der verfügbaren Informationen den unvollständig bekannten Systemanteil zu modellieren.

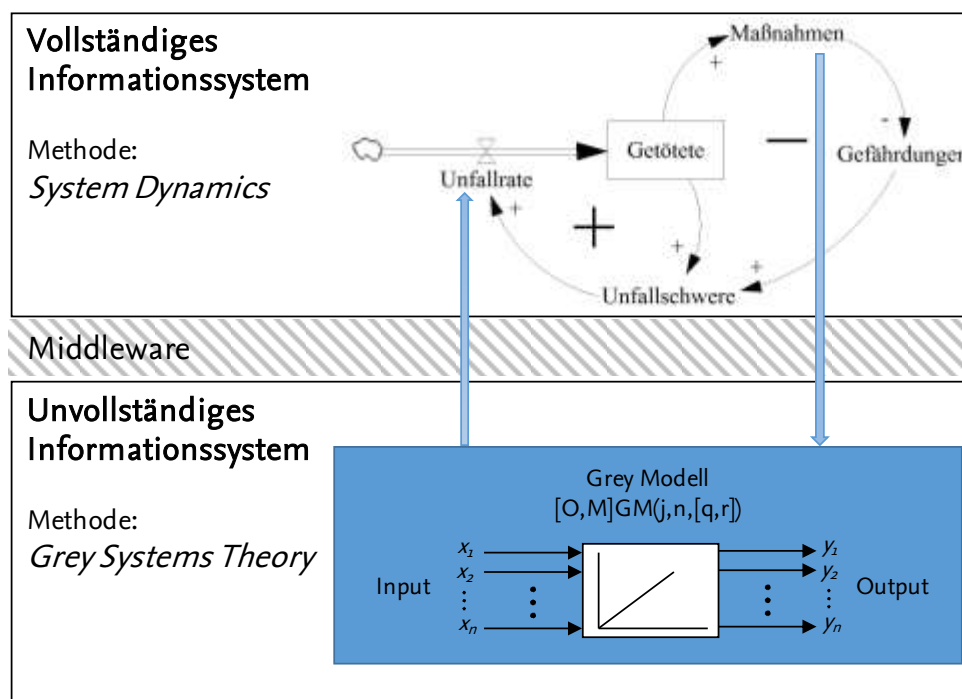


Abbildung 6-19: Modellkonzept der Hybridisierung SD mit GST

Im Zuge der konkreten Umsetzung der Modellierung wurde das in Abschnitt 6.2.2 erstellte System Dynamics-Modell genommen und die Bestimmung der Unfallschwereraterate durch ein erweitertes Grau-Modell erster Ordnung mit zwei Variablen $MGM(1,2)$ ersetzt. Es wird daher der sonst explizit in System Dynamics modellierte Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein einer Verkehrssicherheitsmaßnahme und der Entwicklung der Unfallrate an das Grau-Modell $MGM(1,2)$ gegeben. Die Realisierung der Modellhybridisierung ist mittels Anylogic, Matlab und der Middleware von TLK Thermo® erfolgt. Das System Dynamics Modell wurde in Anylogic implementiert. Das $MGM(1,2)$ Modell aus Abschnitt 6.2.1.3 wurde in Matlab realisiert. Die von TLK Thermo® bereitgestellte Middleware hat daraufhin den Austausch der Daten zwischen den Software-Werkzeugen ermöglicht. Nach jedem Zeitschritt im System Dynamics Modell wurde die komplette Berechnung des $MGM(1,2)$ vorgenommen. Der prognostizierte Wert für den nächsten Zeitschritt aus den Inputs *Unfallrate* und *Maßnahmenpenetration* wurde daraufhin zurück an das System Dynamics Modell gegeben und das SD Modell für den nächsten Zeitschritt

berechnet. Für jeden neuen Zeitschritt wurde das soeben beschriebene Vorgehen erneut wiederholt bis zum Zielzeitpunkt (hier: 2036).

Die Ergebnisse der Modellierung sind in Abbildung 6-20 dargestellt. Es kann gezeigt werden, dass jetzt das System Dynamics-Modell besser in der Lage ist, die oszillierenden Schwingungen des Unfallaufkommens besser abzubilden (gelbe Kurve). Weiterhin wird der Kurvenverlauf der kumulierten Getöteten im Straßenverkehr (blaue Kurve) ähnlich dem reinen System Dynamics-Modell aus Abschnitt 6.2.2 abgebildet.

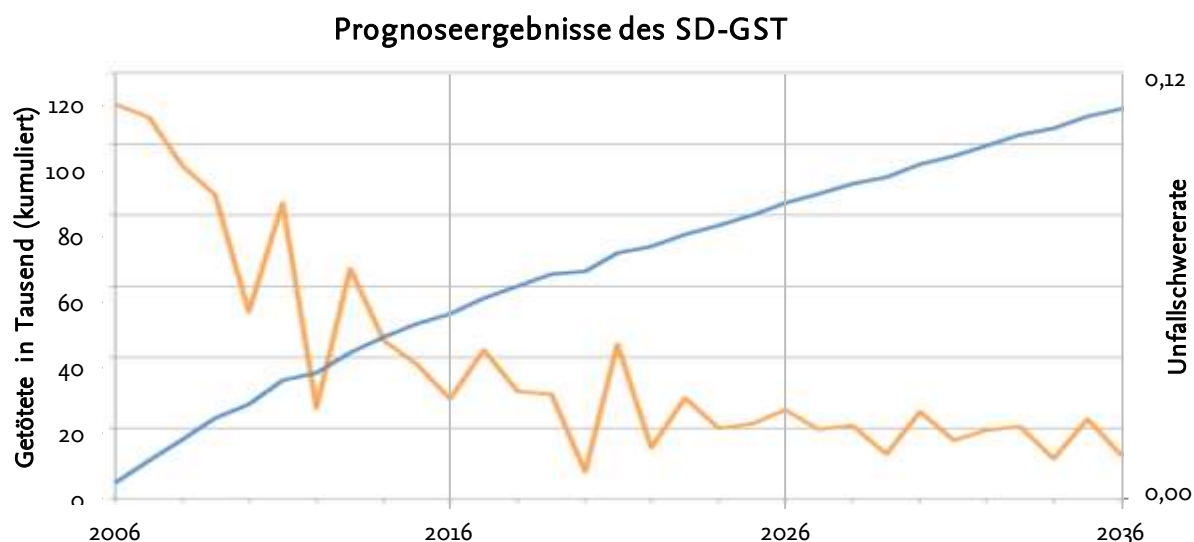


Abbildung 6-20: Ergebnisse der SD-GST-Prognose

Das Antwortverhalten des hybriden SD-GST-Modells scheint hier die Entwicklung der Getöteten im Straßenverkehr plausibel wiedergeben zu können.

6.2.3 Auswahl des Prognoseverfahrens

Nachdem die relevanten datenbasierten und modellbasierten Prognoseverfahren exemplarisch vereinfacht angewendet worden sind, kann die Qualifizierung eines konkret anzuwendenden Verfahrens vorgenommen werden (vgl. Abbildung 6-1). Hierbei ist bei der Wahl des Verfahrens entscheidend, wie hoch der individuelle Erfüllungsgrad des Verfahrens gegenüber den in Abschnitt 6.1 formulierten Anforderungen ist. Hierzu wird ein Abgleich jeder exemplarischen Anwendung mit den Anforderungen durchgeführt und festgestellt, ob ein niedriger Erfüllungsgrad (--), mäßiger Erfüllungsgrad (-), neutraler Erfüllungsgrad (o), guter Erfüllungsgrad (+) oder ein sehr guter Erfüllungsgrad (++) gegeben ist (vgl. Tabelle 6-7 und Tabelle 6-8).

Folgend werden die Erkenntnisse aus den Anwendungen datenbasierter Prognoseverfahren zusammengefasst:

- *Grey-Modell erster Ordnung $GM(1,1)$* : Das Grey-Modell erster Ordnung $GM(1,1)$ zeigt, abhängig von der gewählten Zeitreihe, gute Ergebnisse in den prognostizierten Erwartungswerten. Gerade für den Jahresgang der Zeitreihe der Getöteten konnte das Modell ein plausibles Antwortverhalten wiedergeben (vgl. Abbildung 6-3). Das $GM(1,1)$ ist allerdings als alleiniges Prognoseverfahren ungeeignet, da es nur Prognosen auf Basis einer Zeitreihe erstellen kann und diese Zeitreihe ebenfalls nur bestimmte monotone Verläufe aufzeigen darf. Dies widerspricht der Anf_15, welche fordert, dass mit einer beliebig großen Anzahl von Einflussfaktoren eine Prognose durchgeführt werden muss.

- *Grey-Modelle zweiter Ordnung $GM(2,n)$* : Die Grey-Modelle haben sich durchgängig als untauglich für die Prognose der Verkehrssicherheit erwiesen. Das prognostizierte Systemverhalten des erstellten $GM(2,1)$ zeigt kein plausibles Antwortverhalten und widerspricht insb. den Anforderungen an den physikalischen Geltungsbereich, vgl. Abschnitt 6.1.3. Dem $GM(2,n)$ kann keine ausreichende Qualifizierung zugeordnet werden (siehe auch Tabelle 6-7).
- *Erweiterte Grey-Modelle $MGM(1,1)$* : Die erweiterten Grey-Modelle haben im Gegensatz zum $GM(1,1)$ den Vorteil, dass sie auch für die Integration mehrerer Zeitreihen noch in der Lage sind Prognosen herzustellen. Es bleibt hier offen, inwieweit das $MGM(1,n)$ mit einer sehr hohen Anzahl von Zeitreihen umgehen kann. Es zeigt sich bereits hier von [Liu u. Lin 2011], dass nicht für unendlich viele Zeitreihen die Lösung der zugrundliegenden Differentialgleichungen vorhanden sind – daher kann aktuell davon ausgegangen werden, dass MGMs mit höheren $n > 3$ nicht mehr berechenbar sein werden [Liu u. Lin 2011]. Soweit die an das Grau-Modell gegebene Anzahl von Zeitreihen $n < 3$ ist, zeigt das Modell ein plausibles Systemverhalten und ist in der Lage eine Erwartungsaussage für das Systemverhalten bereitzustellen.
- *Neuronale Netze (NN)*: Die Reinform der neuronalen Netze konnte nicht die Anforderungen an das zu erstellende Prognosemodell erfüllen. Aufgrund der nicht-deterministischen Natur sind die neuronalen Netze allein nicht anwendbar. Je nach Trainingsphase des Netzes liefert das Netz auf ein und denselben Input unterschiedliche Erwartungswerte des Systems. In der exemplarischen Anwendung konnte weiterhin gezeigt werden, dass der physikalische Gültigkeitsbereich sowie die Abweichungen des neuronalen Netzmodells als zu signifikant einzu-
stufen sind, als dass es für die Zwecke dieser Arbeit angewendet werden kann.

Der Erfüllungsgrad der Anforderungskategorien (vgl. Abschnitt 6.1) der datenbasierten Prognoseverfahren ist in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 6-7: Erfüllungsgrad der Anforderungen der datenbasierten Prognoseverfahren

Anforderungen	$GM(1,1)$	$GM(2,1)$	$MGM(1,3)$)	NN
Modellvereinfachung	-	-	-	o
Modellkonzept und -parameter	+	--	++	+
physikalischer Gültigkeitsbereich	++	--	++	-
Modellgrenzen	+	+	++	++
Grenzwerte und Verhalten	+	-	+	-

Die zweite Gruppe der zu qualifizierenden Verfahren stellen die modellbasierten Prognosen dar. Folgend werden die erarbeiteten Ergebnisse der exemplarischen Anwendung eines System Dynamics-Modells sowie der Hybridisierung aus neuronalen Netzen und genetischen Algorithmen und der Hybridisierung aus System Dynamics und der Grey Systems Theory zusammengetragen:

- *System Dynamics (SD)*: System Dynamics scheint anhand der durchgeführten Qualifizierung methodisch und konzeptionell in der Lage zu sein, die Fragestellung der Arbeit zu beantworten. Da es sich hierbei um einen systemtheoretischen Ansatz handelt, wird vorausgesetzt, dass

die Systemmechanismen bekannt sind. Da dieser Umstand nicht vollständig gegeben ist (vgl. Abschnitt 2.5), kann nicht zwingend davon ausgegangen werden, dass die Wirkzusammenhänge des Verkehrssystems plausibel und vollständig für eine Vielzahl von Verkehrssicherheitsmaßnahmen erarbeitet werden kann. Insbesondere die avisierte Wirkfeld-Prognose (vgl. Abschnitt 1.5) würde für jede Maßnahme ein eigenes System Dynamics-Modell erfordern, welches wiederum mit einer Vielzahl weiterer Modelle vereint werden müsste. Dieses Multi-Netz-Modell widerspricht den Anforderungen an die Modellvereinfachung (vgl. Abschnitt 6.1.1) und wird als nicht praktisch realisierbar im Rahmen dieser Arbeit angesehen. Daher kann der System Dynamics-Ansatz in seiner Reinform nicht ausreichend qualifiziert werden.

- *Hybridisierung System Dynamics mit Grey-Modellen (SD-GST)*: Grundlegend konnte durch die Hybridisierung gezeigt werden, dass eine Kombination aus System Dynamics und Grey Systems Theory realisierbar ist. Wie zuvor angemerkt wurde, ist die primäre Schwäche des System Dynamics-Ansatzes die komplexen Wirkzusammenhänge vollständig zu beschreiben. Durch die Hybridisierung wird die Schätzung der korrekten Parameter der Wirkzusammenhänge an das Grey-Modell gegeben und ist somit ein Optimierungs- und kein Modellierungsproblem. Da entsprechend den Anforderungen aus den Abschnitten 6.1.1 und 6.1.4 eine umfangreiche Betrachtung des Unfallaufkommens prognostiziert werden soll, wird sich daher gegen das hybride Verfahren der SD-GST entschieden. Die zur vollständigen Modellerstellung notwendige Beschreibung der Wirkzusammenhänge wird weiterhin als zu groß bewertet, als dass eine vollständige Umsetzung der Fragestellung mit SD-GST durchgeführt werden kann. Dennoch konnte das hybride Modell eine Prognose zeigen, welche ein plausibles Antwortverhalten abbildet.
- *Hybridisierung neuronaler Netze mit genetischen Algorithmen (NN-GA)*: GABP-Netze zeigen diverse Vorteile hinsichtlich der Anwendbarkeit im Rahmen dieser Arbeit. Hinsichtlich der Integrierbarkeit von beliebig vielen Zeitreihen zur Erkennung von Kausalitäten scheinen hier die Neuronalen Netze nicht beschränkt; gleichfalls kann durch die Anwendung des genetischen Algorithmus sichergestellt werden, dass das Netz in der Lage ist, die interessierende Systemantwort wiederzugeben und die richtigen Muster/Kausalitäten in den Zeitreihen erlernt. Wie bereits in der vorhergehenden Betrachtung der Hybridisierung SD-GST festgestellt wurde, ist anzustreben, dass das Erkennen der Wirkzusammenhänge im Verkehrssystem als Optimierungsproblem dargestellt werden sollte und weniger als Modellierungsproblem.

Die Methodenqualifizierung hat demnach ergeben, dass grundsätzlich die hybriden Prognoseverfahren für die avisierte Fragestellung anzuwenden sind (vgl. Tabelle 6-8).

Tabelle 6-8: Erfüllungsgrad der Anforderungen der modellbasierten Prognoseverfahren

Anforderungen	SD	NN-GA	SD-GST
Modellvereinfachung	o	++	+
Modellkonzept und -parameter	+	++	+
physikalischer Gültigkeitsbereich	+	++	++
Modellgrenzen	++	++	++
Grenzwerte und Verhalten	++	++	+

Den höchsten Übereinstimmungsgrad gegenüber den Anforderungen zeigt hier das durch genetische Algorithmen optimierte Verfahren der neuronalen Netze (vgl. Abschnitt 6.2.2.2). Die detaillierten Ergebnisse der Prüfung gegen die Anforderungen an das Prognosemodell sind im Anhang E bereitgestellt.

Zwar konnte durch die exemplarische Anwendung der verfügbaren Prognoseverfahren ein geeignetes Verfahren identifiziert werden, allerdings konnte bisher keine konkrete Ausprägung des anzuwendenden neuronalen Netzes festgelegt werden, weil dies maßgeblich von der Ausgestaltung des zu entwickelnden Prognoseverfahrens abhängig ist. Das in dieser Arbeit zu entwickelnde Verfahren der Wirkfeld-Prognosen stellt somit die Kombination aus den folgenden Abschnitten 6.3 und 6.4 dar und wird dort ausführlich hergeleitet.

6.3 Sicherheitspotential

Nachdem die neuronalen Netze als anzuwendendes hybrides Prognoseverfahren ausgewählt worden sind, ist es erforderlich das Sicherheitspotential im Rahmen dieser Arbeit so zu definieren, dass es als Eingangsgröße an das neuronale Netz gegeben werden kann. Dabei soll das Sicherheitspotential entsprechend den in Abschnitt 6.1.2 formulierten Anforderungen als risikometrische Größe das erwartete Sicherheitspotential aller im Verkehrssystem enthaltenen Maßnahmen normiert abbilden können. Formal ist das Sicherheitspotential $R(t)$ von drei Einflussparametern abhängig, hier dem Sicherheitsgewinn S , der Systempenetration $M(t)$ und dem Wirkfeld A . Das Sicherheitspotential ist definiert als folgende Funktion:

$$R_i(t) = f[S_i, M_i(t), A_j] \quad (6.12)$$

Anhand der Abbildung 6-21 ist zu erkennen, dass die Funktion des Sicherheitspotentials einer fallenden S-Kurve über die Zeit entspricht. Das Sicherheitspotential wird dabei so ausgelegt, dass, soweit eine Maßnahme nicht im Verkehrssystem vorhanden ist, der risikometrische Wert auf 1 gesetzt wird.

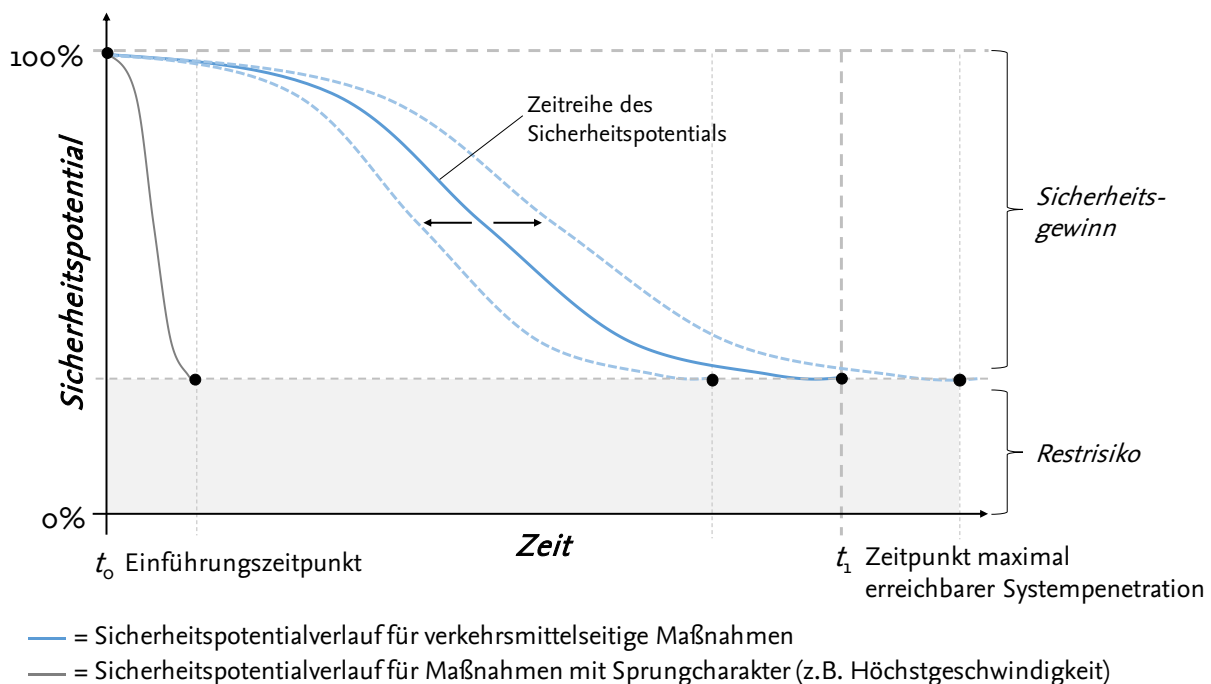


Abbildung 6-21: Konzeption des formalen Zusammenhangs des Sicherheitspotentials

Demnach ist das nicht adressierte Risiko im Verkehrssystem latent vorhanden. Ab dem Einführungszeitpunkt der Maßnahme t_0 beginnt die risikometrische Funktion des Sicherheitspotentials s -förmig abzunehmen. Es erreicht die maximale Reduktion des Restrisikos nach Erreichen des Zeitpunkts t_1 ; hier ist die Maßnahme vollständig im Verkehrssystem vorhanden. Die von der Zeit abhängige Komponente in dem funktionalen Zusammenhang des Sicherheitspotentials $R(t)$ ist die Systempenetration $M(t)$. Diese steigt von 0% auf maximal 100% an. Hierdurch lassen sich insbesondere auch Systempenetrationsraten von gesetzlichen Maßnahmen abbilden, welche z. B. unmittelbar das gesamte Verkehrsgeschehen beeinflussen (sog. Sprünge, vgl. Abschnitt 1.1 und 2.3). Anhand der Abbildung 6-21 ist zu sehen, dass die Kurve des Sicherheitspotentials nicht zwingend den Wert 0 erreicht. Dies ist damit begründet, dass die Maßnahme nicht zwingend vollständig in der Lage ist alle im Wirkfeld vorhandenen Unfallereignisse zu verhindern. Das Minderungspotential definiert sich dabei durch den Sicherheitsgewinn S der Maßnahme; es bleibt ein Restrisiko im Wirkfeld vorhanden. Weiterhin muss das Sicherheitspotential einer Maßnahme einem konkreten Wirkfeld zugeordnet werden; nicht jede Maßnahme wird in jedem Wirkfeld einen Effekt erzielen (z. B. ein Nachtsichtassistent wird nicht das Unfallaufkommen von Unfällen bei Tageslicht beeinflussen). Das grundlegende Konzept des Sicherheitspotentials, welches bereits ansatzweise in Abschnitt 1.5 zu der hier entwickelten Wirkfeld-Prognose dargestellt wurde, findet sich in der folgenden Abbildung 6-22 detailliert wieder.

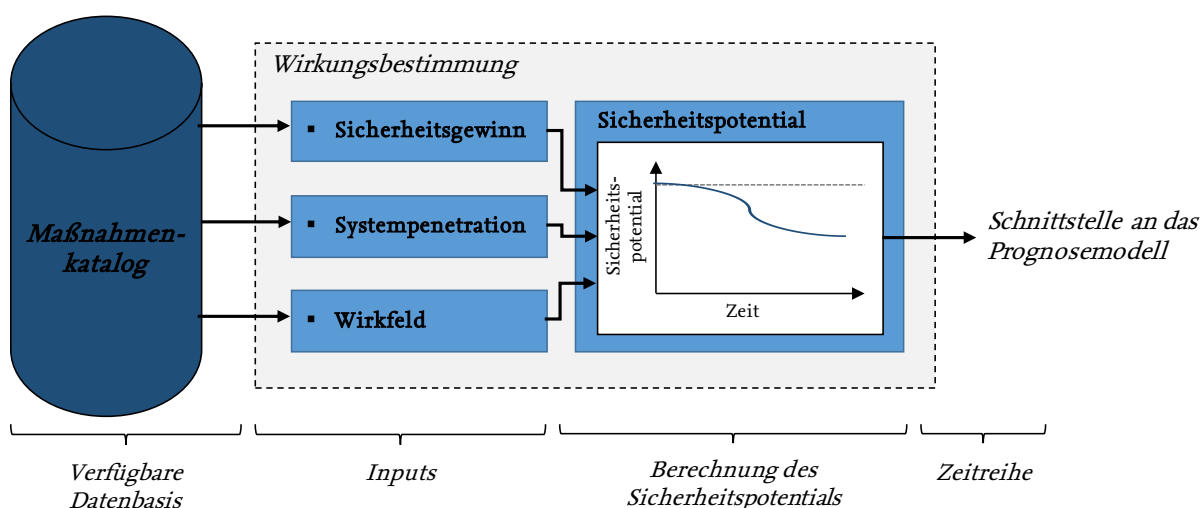


Abbildung 6-22: Konzept des Sicherheitspotentials in der modellbaiserten Verkehrssicherheitsprognose

Das hier definierte Sicherheitspotential $R(t)$ folgt einem funktionalen Zusammenhang, da es allerdings als Zeitreihe an das neuronale Netz gegeben werden muss, wird im Vorfeld der Prognose für die betreffende Maßnahme i eine Zeitreihe aus dem konkreten funktionalen Ausdruck $R_i(t)$ erstellt. Voraussetzung zur Berechnung der Zeitreihe des Sicherheitspotentials ist die Verfügbarkeit der Notwendigen Informationen über die Maßnahme (z. B. Einführungszeitpunkt, aktuelle Systempenetration, erwarteter Sicherheitsgewinn, relevante Wirkfelder). Diese Informationen werden auf Basis des zu entwickelten Maßnahmenkatalogs (siehe Abschnitt 7.1) gewonnen. Im Folgenden werden die formalen Definitionen des Sicherheitsgewinns S (siehe Abschnitt 6.3.1), der Systempenetration $M(t)$ (siehe Abschnitt 6.3.2), des Wirkfelds A (siehe Abschnitt 6.3.3) und des Sicherheitspotentials $R(t)$ (siehe Abschnitt 6.3.4) hergeleitet.

6.3.1 Formale Definition des Sicherheitsgewinns S

Der erwartete Sicherheitsgewinn einer Maßnahme stellt den erwarteten Sicherheitsnutzen einer Maßnahme in einem Wirkfeld dar. Diese Größe wird i.d.R. im Rahmen der Durchführung der simulationsbasierten Wirkungsanalysen bestimmt, vgl. Abschnitt 4.4. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Sicherheitsgewinn S als eine dimensionslose Größe (in %) definiert und lehnt sich damit an die Definition von [Busch 2003] an.

Der Sicherheitsgewinn S_i definiert sich demnach als die prozentuale Reduktion des Unfallaufkommens U in einem Wirkfeld (oder einer Reihe von Wirkfeldern) durch das Vorhandensein einer Sicherheitsmaßnahme. Es gilt dabei der formale Zusammenhang:

$$S_i = 1 - \frac{U_{alt,i} - U_{neu,i}}{U_{alt,i}} \quad (6.13)$$

Wobei $U_{alt,i}$ das Unfallaufkommen (absolute Anzahl der Unfälle) in einem Wirkfeld i ohne das Vorhandensein einer Maßnahme beinhaltet und $U_{neu,i}$ das Unfallaufkommen im betreffenden Wirkfeld bei vollständiger Systempenetration der Maßnahme beschreibt. In Abbildung 6-23 ist der formale Zusammenhang noch einmal grafisch zur Verdeutlichung bereitgestellt.

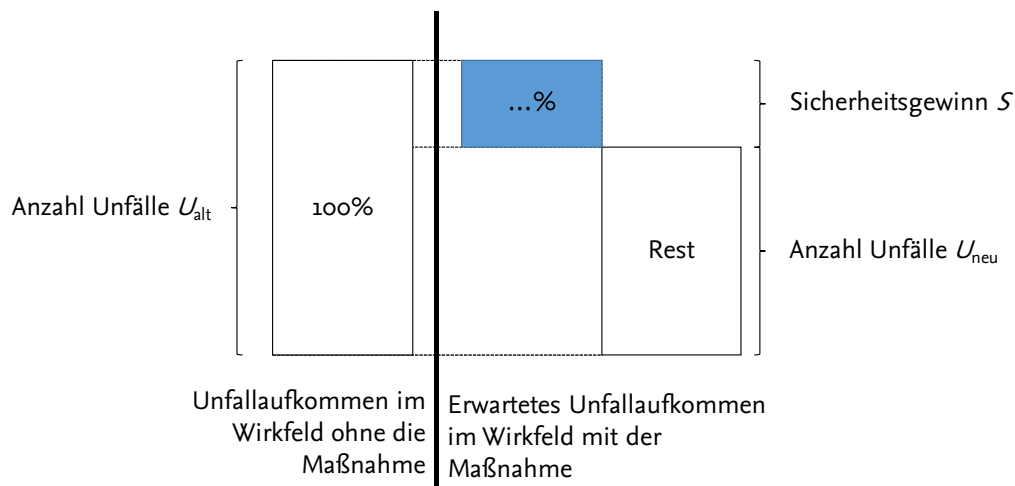


Abbildung 6-23: Definition des Sicherheitsgewinns, in Anlehnung an [Busch 2005]

6.3.2 Formale Definition der Systempenetration $M(t)$

Jeder Maßnahme kann eine aktuelle Systempenetration zugeordnet werden. Dabei beschreibt die Systempenetration einerseits den Grad der Systemdurchdringung der Maßnahme, z. B. wie viele Fahrzeuge mit der Maßnahme ausgestattet sind (auch als Marktdurchdringung⁹ zu verstehen). Andererseits muss durch die Systempenetration der zeitliche Verlauf des Prozesses der Systempenetration beschrieben werden können.

Bei der Erstellung des formalen Zusammenhangs der Systempenetration wird sich im Rahmen dieser Arbeit an das Bass-Diffusions-Modell gehalten. Das Modell wurde ursprünglich vorgestellt, um die Einflüsse der Marktdurchdringung von neuen Produkten zu beschreiben. Es

⁹ Da der Begriff der Marktdurchdringung fest in den Wirtschaftswissenschaften definiert ist, wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff der Systempenetration eingeführt, der sich nicht ausschließlich auf die Durchdringung von Produkten in einem endlichen Marktumfeld reduziert.

konnte bereits in unterschiedlichen Arbeiten gezeigt werden, dass mittels des mathematischen Bass-Diffusions-Modells die zeitliche Marktdurchdringung modelliert werden kann. [Bass 1969] definiert die Marktdurchdringungsfunktion neuer Produkte als es eine s-förmige Exponentialfunktion:

$$N(t) = \frac{m(1-e^{-(p+q)t})}{1+\frac{q}{p}e^{-(p+q)t}}, \quad (6.14)$$

mit

- N kumulierte Anzahl der Maßnahmen im System
- t Zeit
- p Innovationskoeffizient
- q Imitationskoeffizient
- m Markt-/Systempotential

Die Änderung von N ist demnach ausschließlich abhängig von der Zeit t ; die Parameter p , q , m sind unveränderlich und müssen analytisch bestimmt werden. Die Marktdurchdringung $M(t)$ eines Produkts wird demnach wie folgt definiert:

$$M(t) = \frac{N(t)}{m} = \frac{(1-e^{-(p+q)t})}{1+\frac{q}{p}e^{-(p+q)t}}, \quad (6.15)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wird folglich eine Analogie zu dem Bass-Diffusions-Modell gezogen: Die Einführung neuer Maßnahmen wird als Produkteinführung verstanden. Durch Bestimmung der Parameter der jeweiligen Innovationskoeffizienten p , Imitationskoeffizienten q und dem Markt-/Systempotential m lässt sich folglich für jede Maßnahmen-Art eine Systempenetrationskurve $M(t)$ ermitteln. Die Bestimmung der Parameter p , q und m wird im Rahmen der Definition des Sicherheitspotentials erarbeitet (siehe Abschnitt 6.3.4).

6.3.3 Formale Definition des Wirkfelds A

Das Wirkfeld A klassifiziert die Unfalltypen, welche durch die jeweilige Maßnahme beeinflusst werden können. Die Definition des Wirkfelds muss dabei an die verfügbare Datenbasis des Prognosemodells angepasst werden. Entsprechend der Anforderungen aus Abschnitt 6.1 wird ausschließlich eine öffentlich verfügbare Datenbasis verwendet. Demnach werden die Zeitreihen der [destatis 2017] verwendet, diese unterteilen dabei das Unfallaufkommen hinsichtlich unterschiedlicher Attribute:

- Straßenverkehrsunfälle
- Beteiligte
- Verunglückte
- Unfallursachen

Die Zeitreihen der Straßenverkehrsunfälle gliedern die Unfälle und Verunglückten z. B. nach Ortslage, Straßenkategorien, Bundesländern, Monaten, etc. Die Zeitreihen der Beteiligten zeigen die Beteiligten an Unfällen auf, die Hauptverursacher und z. B. die Altersverteilung der Beteiligten. Die Zeitreihen der Verunglückten differieren ebenfalls zwischen der Art der Verkehrsbeteiligung, den Alters- und Geschlechtsgruppen sowie einer Betrachtung von verunglückten Kindern und Senioren. Die letzte Kategorie der Unfallursachen erfasst die Verkehrsunfälle ausgelöst durch Fehlverhalten, Wildunfälle, Unfälle verursacht durch Nebel und z. B. Unfälle durch Rauscheinfluss [destatis 2017].

Um nun eine Zuordnung des Wirkfelds A zu einer spezifischen Maßnahme der relevanten Zeitreihen herzustellen, wird eine Matrix definiert: Die Wirkfeldmatrix ordnet die Maßnahmen den relevanten Zeitreihen der Datenbasis zu. Dabei stellen die Spalten n die jeweiligen Maßnahmen und die Zeilen m die relevanten Zeitreihen der Datenbasis dar:

$$A_{Wirkfeld} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

Sobald die Werte von a_{mn} den Bool'schen Wert „1“ annehmen, impliziert dies, dass diese Maßnahmen in diesem Wirkfeld wirksam sind. Im Gegensatz dazu bedeutet der Bool'sche Wert „0“, dass keine Sicherheitswirkung der Maßnahmen zu erwarten ist.

6.3.4 Formale Definition des Sicherheitspotentials $R(t)$

Nachdem die relevanten Parameter des Sicherheitsgewinns S , der aktuellen Systempenetration $M(t)$ und die relevanten Wirkfelder $A_{Wirkfeld}$ zur Bestimmung des Sicherheitspotentials $R(t)$ formal definiert sind, kann die formale Definition des Sicherheitspotentials erfolgen. Die risikometrische Funktion des Sicherheitspotentials wird im Rahmen dieser Arbeit als eine fallende S-Kurve definiert und folgt der folgenden Definition:

$$R_i(t) = 1 - S_i \cdot M_i(t) \quad (6.17)$$

Aus der Formel 6.15 folgt

$$R(t) = 1 - S \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}} \quad (6.18)$$

Das Sicherheitspotential kann daher als Regressionsmodell beschrieben werden. Es gibt insgesamt zwei gegebene Bedingungen, die zur Lösung des Regressionsmodells bereitgestellt werden müssen: Die erste ist das Einführungsjahr t_0 und die zweite Bedingung ist die aktuelle Systempenetrationsrate im aktuellen Jahr.¹⁰ Zur Lösung der Parameter p , q und m muss ein Optimierungsverfahren angewendet werden, welches die Funktion $R(t)$ durch den Startpunkt t_0 und durch die aktuelle Marktdurchdringungsrate $M_i(t_{\text{aktuell}})$ legt. Infolgedessen wird das Verfahren nach [Rajkumar u. Kumar 2002] angewendet: Das Verfahren von [Rajkumar u. Kumar 2002] nutzt einen genetischen Algorithmus zur Bestimmung der Parameter p , q und m unter Einhaltung der Randbedingungen t_0 und $M_i(t_{\text{aktuell}})$.

Das Sicherheitspotential ist somit ausreichend inhaltlich und formal definiert, damit es im Rahmen der Verkehrssicherheitsprognose angewendet werden kann.

¹⁰ Im Rahmen des Maßnahmenkatalogs müssen zwei Parameter zur Bestimmung der Systempenetration erhoben werden: Der *Zeitpunkt der Einführung* der Maßnahme im System und der *aktuelle Grad der Systempenetration*.

6.4 Prognosemodell

Das konkret umzusetzende hybride Prognosemodell sieht die Nutzung eines neuronalen Netzes optimiert durch einen genetischen Algorithmus vor. Das hier entwickelte Prognosemodell zur Verkehrssicherheit ist in der folgenden Abbildung 6-24 dargestellt.

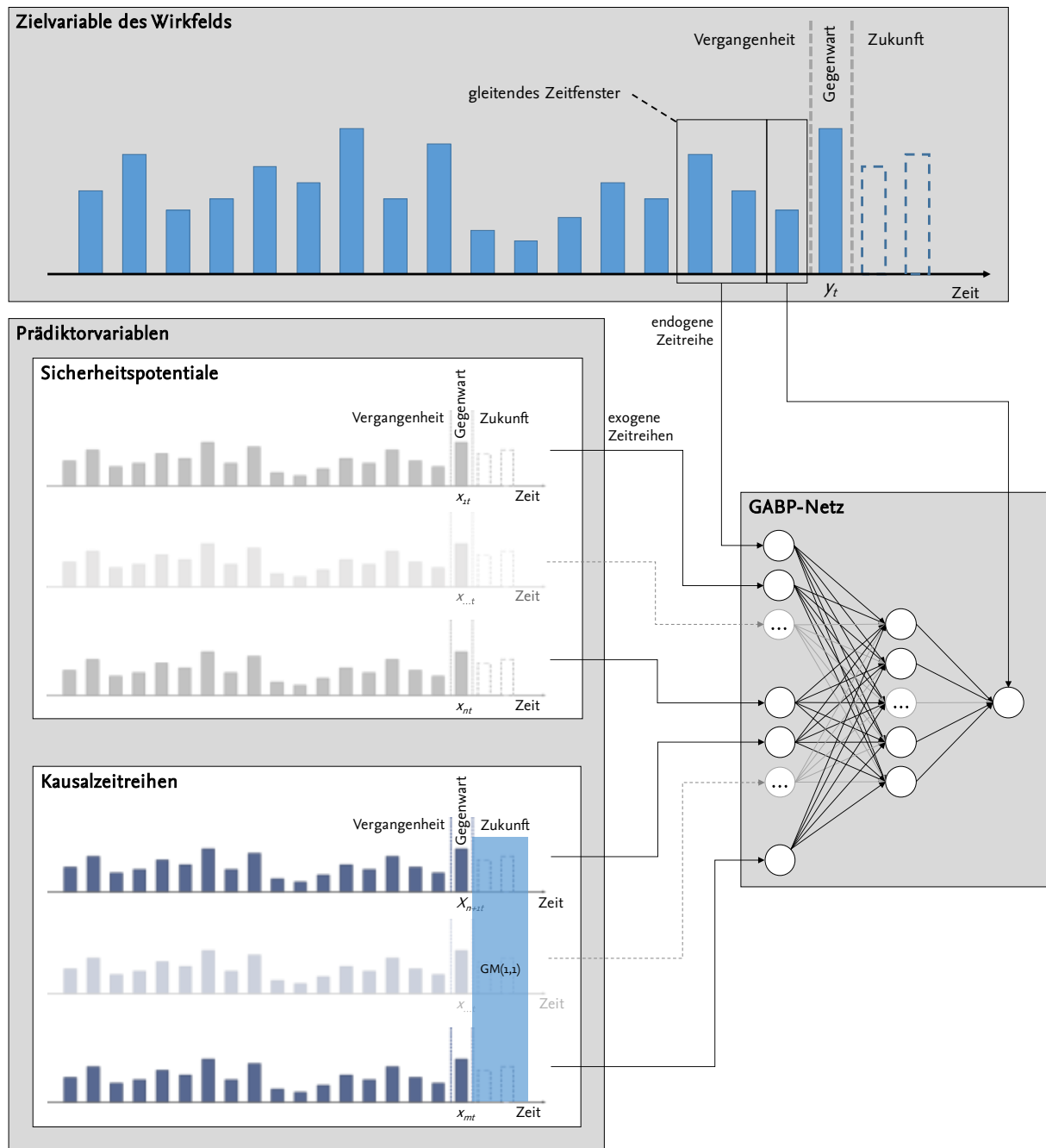


Abbildung 6-24: Modell der Straßenverkehrssicherheitsprognose

Anhand der Abbildung 6-24 ist zu erkennen, dass das Prognosemodell zwei grundlegende Arten von Modell-Inputs aufweist:

1. *Zielvariable des Wirkfelds:* Dieser Modell-Input stellt die zu prognostizierende Zeitreihe des relevanten Unfallaufkommens eines Wirkfelds aus der Unfalldatenbank dar. Dieser

Input wird direkt aus der Unfalldatenbank gewonnen und muss entsprechend den Anforderungen aus Abschnitt 6.1.3 eine äquidistante Zeitreihe darstellen. Die Definition der Zielvariablen wird in Abschnitt 6.4.3.1 vorgenommen.

2. *Prädiktorvariablen:* Die Prädiktorvariablen unterteilen sich ihrerseits in die Sicherheitspotentiale und die Kausalzeitreihen. Die Herleitung der Sicherheitspotentiale wurde bereits in Abschnitt 6.3.4 beschrieben. Inwieweit die Zeitreihen der Sicherheitspotentiale an das neuronale Netz zu geben sind, wird in Abschnitt 6.4.3.2 beschrieben. Die Kausalzeitreihen stellen die zweite Gruppe der Prädiktorvariablen dar. Diese Zeitreihen haben einen korrelativen Zusammenhang zum Unfallaufkommen im relevanten Wirkfeld. Die konkrete Definition der Kausalzeitreihen wird in Abschnitt 6.4.3.3 vorgenommen.

Der Modell-Output bildet daraufhin das prognostizierte Unfallaufkommen im betreffenden Wirkfeld unter Berücksichtigung des Sicherheitsnutzens aller im Wirkfeld verorteten Maßnahmen. Daher ist das hier entwickelte Modell zur Straßenverkehrssicherheitsprognose in der Lage eine beliebig große Anzahl von Einflussfaktoren auf ein Wirkfeld zu prognostizieren.

Voraussetzung für ein plausibles Verhalten des Neuronalen Netzes sind kausal-abhängige Prädiktorvariablen, welche es dem Netz erst ermöglichen, die interessierenden Strukturen in den Zeitreihen zu erlernen und basierend auf dem erlernten die Prognose zu erstellen. Die Zeitreihen der risikometrischen Größe des Sicherheitspotentials (vgl. Abschnitt 6.3) sind dabei nicht ausreichend, da sie zwar das adressierte Unfallrisiko einer Maßnahme quantifizieren, dieses aber nur von der Systempenetration zeitlich abhängig ist und nicht das reale Verkehrsunfallgeschehen abbildet. Daher ist eine begründete Auswahl von weiteren Prädiktorvariablen, hier genannt Kausalzeitreihen, für das neuronale Netz notwendig. Es gibt bisher kein standardisiertes Vorgehen bei der Wahl der kausalen Prädiktorvariablen. Diverse mathematische Verfahren sind geeignet, welche Kausalitäten zwischen Zeitreihen herstellen, z. B. die klassische Korrelationsanalyse nach Pearson oder die Hauptkomponentenanalyse [Leiner 2004].

6.4.1 Multilayer Perceptron Netz

In der konkreten Umsetzung des neuronalen Netzes wird ein vorwärtsgerichtetes Netz des Typs Multilayer Perceptron genutzt. Das Multilayer Perceptron verwendet ein induktives Modellkonzept (vgl. Abschnitt 5.4): Es wird auf Basis der Modell-Inputs (Einzelereignissen) auf das Systemverhalten im relevanten Wirkfeld (Zielvariable) geschlossen und die Prognose erstellt. Folgend wird das verwendete Multilayer Perceptron formal beschrieben und hergeleitet: Für jedes Wirkfeld wird ein individuelles Multilayer Perceptron Netz erstellt. Die jeweiligen sind dabei einschichtig und werden mittels der Backpropagation angelernt. Die Backpropagation ist ein häufig genutztes überwachtes Lernverfahren für neuronale Netze. Zielsetzung des Verfahrens ist es den Fehler zwischen einem erwarteten und realen Netzoutput durch das Gradientenabstiegsverfahren zu minimieren. Die Bezeichnung des Backpropagations-Algorithmus ergibt sich aus dem Zurückpropagieren des Fehlers (engl. error back-propagation). Sei hierbei n die Anzahl der Gewichte w im neuronalen Netz, so definiert sich die Fehlerfunktion nach

$$E(\vec{w}) = E(w_1, \dots, w_n). \quad (6.19)$$

Sei weiterhin N die Anzahl der Muster aus bekannten Paaren von Inputs \vec{t} und erwarteten outputs \vec{o} , hierbei ist $s(\vec{t})$ der von einem Netz generierte Output-Vektor für einen Input-Vektor \vec{t} . Der Fehler pro Muster ergibt mittels des quadratischen Abstands zwischen erwartetem und realem Output als

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_i (s(\vec{t}_p)_i - o_{pi})^2. \quad (6.20)$$

Als Gesamtfehler für das Netz ergibt sich $E = \sum_{p=1}^N E_p$. Der Fehler eines Netzes ist damit direkt von der Gewichtung \vec{w} abhängig. Um nun den Gesamtfehler durch die Optimierung der Gewichtungen zu reduzieren, wird algorithmisch bei der Durchführung der Backpropagation vorgegangen:

1. Ein Eingabemuster (Netzwerkparameter) wird angelegt und vorwärts durch das neuronale Netz propagiert.
2. Der vom Netz generierte Output-Vektor $s(\vec{t})$ wird mit dem Input-Vektor \vec{t} verglichen und die Fehlerdifferenz E_p der beiden Vektoren berechnet.
3. Der Fehler E_p wird nun wieder über die Ausgabe- zur Eingabeschicht zurück propagiert. Dabei werden die Gewichtungen w_n der Neuronenverbindungen abhängig von ihrem Einfluss auf den Fehler E_p geändert. Dies optimiert bei einem erneuten Anlegen der Eingabe eine Annäherung an die gewünschte Ausgabe.

Der grundlegende Backpropagations-Algorithmus ist in folgender Abbildung 6-25 dargestellt.

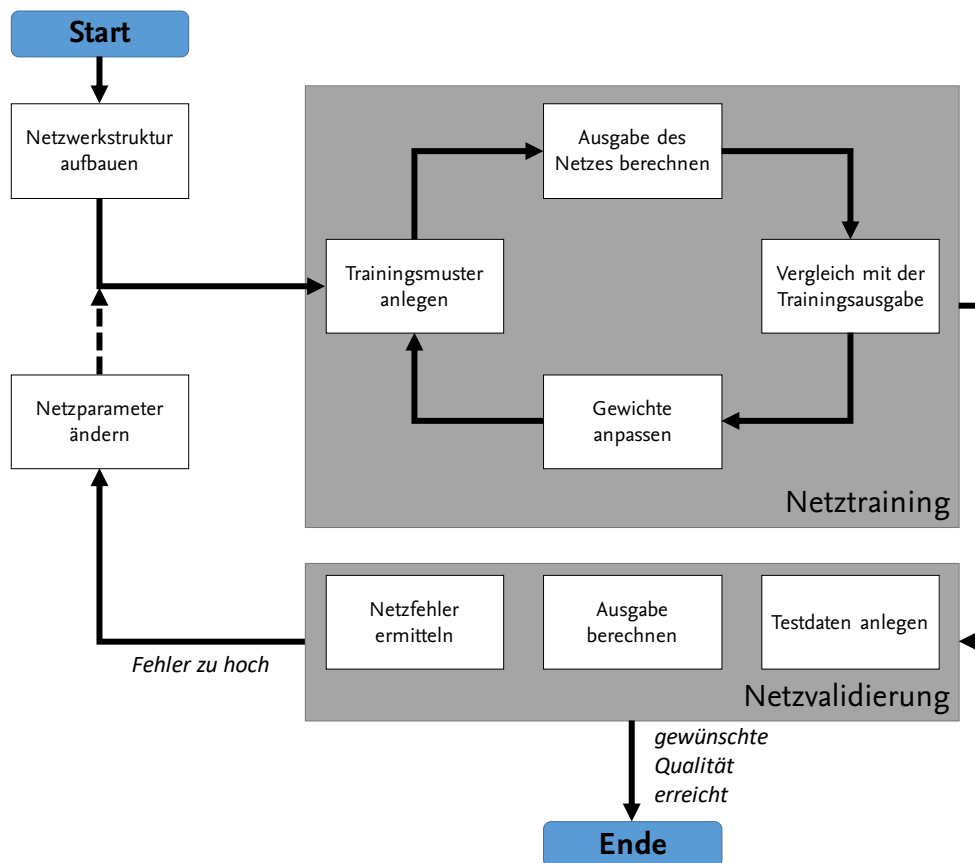


Abbildung 6-25: Grundlegender Backpropagations-Algorithmus

Wie bereits in Abschnitt 6.2.1.4 gezeigt wurde, sichert die Backpropagation nicht zwingend, dass das neuronale Netz die gewünschten Kausalitäten in den Input-Vektor \vec{t} erlernt. Daher ist eine weitergehende Optimierung des Netzes notwendig, um dafür zu sorgen, dass das Netz in der Lage ist umfänglich die Wirkzusammenhänge im interessierenden System zu erlernen. Hierzu wird das Lernverfahren der Backpropagation mit dem Verfahren der genetischen Algorithmen kombiniert. Dies wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

6.4.2 Modelloptimierung

Die Zielsetzung der Nutzung von genetischen Algorithmen zur Modelloptimierung des Multilayer Perceptrons beim Backpropagations-Verfahren besteht nun darin, durch Simulation von n BP-Netzen die optimalen Netzwerkparameter zu finden [Xie u. Mei 2001].

Das Verfahren der genetischen Algorithmen wurde erstmals von Hollands entwickelt. Der Vorteil der genetischen Algorithmen besteht in der Fähigkeit komplexe Optimierungsprobleme zu lösen. Genetische Algorithmen basieren auf probabilistischen Algorithmen, die natürlich Evolutionsprozesse nachahmen. Mithilfe einer Population von Individuen $P(t) = \{a_1(t), \dots, a_n(t)\}$, mit t als Iterationsschritt, wird eine parallele Suche im Raum des zu optimierenden Problems durchgeführt. Die Individuen $a_i(t)$ sind dabei als mögliche Lösung des Optimierungsproblems anzusehen. Die Güte der Individuen wird als Fitness bezeichnet, welche durch eine Zielfunktion bestimmt wird. Für die Suche nach der optimalen Lösung werden zwei Operatoren verwendet:

- *Selektion*: hierdurch werden abhängig von der Fitness die Individuen für eine Reproduktion ausgesucht. Gute Lösungen werden konserviert und schlechte Ergebnisse eliminiert. Der Nachteil an der Selektion besteht in der Diversitätsreduktion der Population. Um diesem Diversitätsverlust entgegenzuwirken, wird der Operator Variation angewendet.
- *Variation*: Unter Variation werden zwei weitere Operatoren in dem Verfahren der genetischen Algorithmen eingeführt. Durch die Operationen der Rekombination und Mutation können die genetischen Informationen der Individuen erneut kombiniert werden.

Sobald vom genetischen Algorithmus durch Anwendung der benannten Operatoren das entsprechend der Zielfunktion beste Individuum bestimmt werden konnte, gilt das Optimierungsproblem als gelöst. Der grundlegende genetische Algorithmus ist in folgender Abbildung 6-26 dargestellt. Das hier vorhandene Optimierungsproblem besteht nun in der Identifizierung der optimalen Netzwerkparameter des neuronalen Netzes.

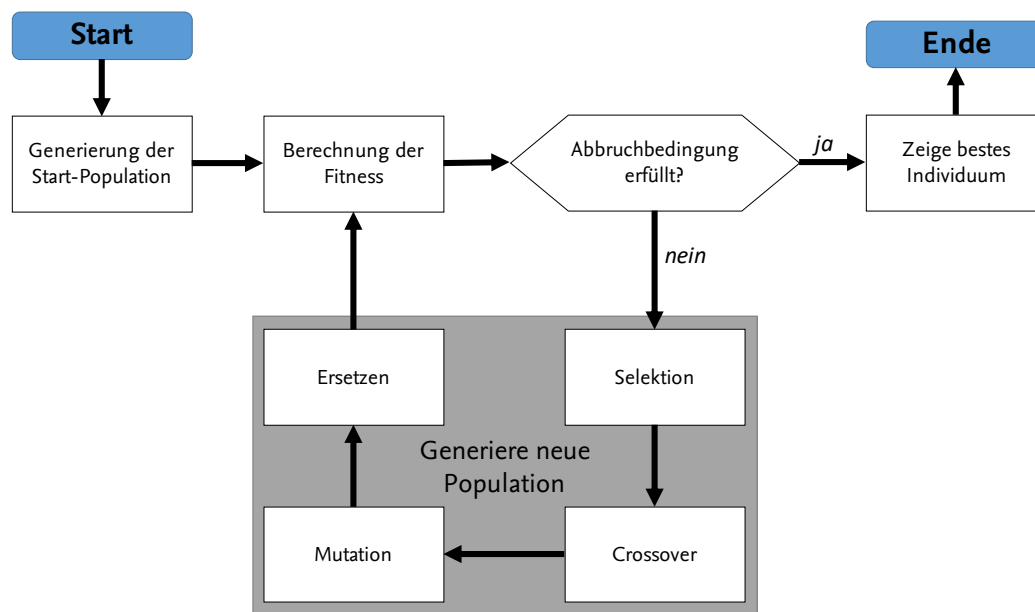


Abbildung 6-26: Grundlegender genetischer Algorithmus

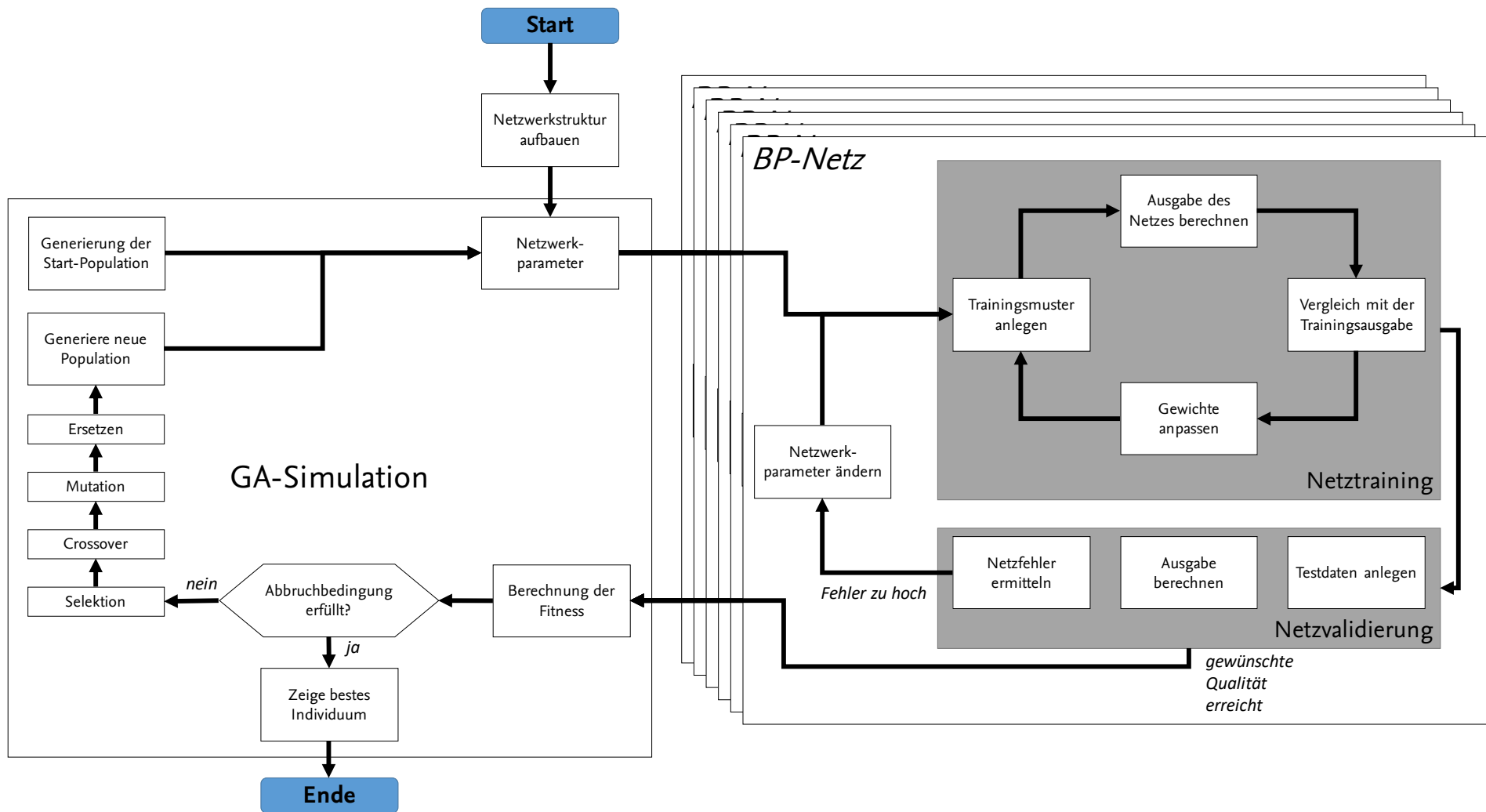


Abbildung 6-27: Prozessmodell des GABP Verfahrens

Das Optimierungsproblem besteht in der Minimierung der quadratischen Abweichung des Output-Vektor $s(\vec{t})$ des neuronalen Netzes im Vergleich zum Input-Vektor \vec{t} . Die Population für die Optimierung stellt folglich eine zufällige Anfangskombination der Netzwerkparameter dar. Jeder Satz an Netzwerkparameter für das zu entwickelnde Netz wird als Individuum verstanden. Der genetische Algorithmus simuliert nun folglich n Multilayer Perceptron Netze mit den Netzwerkparametern aus der Anfangspopulation. Durch die Backpropagation kann für jedes Netz die optimale Lösung gefunden werden. Sobald das Multilayer Perceptron Netz hier den gewünschten Output-Vektor $s(\vec{t})$ mit dem geringsten quadratischen Fehler identifiziert, werden die genetischen Informationen des Individuums an den genetischen Algorithmus gegeben. Dieser vergleicht die Lösung des Individuums entsprechend der Zielfunktion gegenüber allen weiteren Individuen. Soweit das Optimierungsproblem nicht gelöst werden konnte, werden die Operatoren der Selektion und Variation angewendet. So wird eine neue Population mit optimierten genetischen Informationen geschaffen. Mit dieser Population wird erneut eine Simulation von n Multilayer Perceptron Netzen durchgeführt. Der genetische Algorithmus wiederholt so oft die Simulation der Multilayer Perceptron Netze, bis das Gütekriterium ausreichend erfüllt ist. Der grundlegende Prozess des GABP-Verfahrens ist in der folgenden Abbildung 6-27 dargestellt. Das definierte GABP-Verfahren wird für jedes zu prognostizierende Wirkfeld der Prognose erstellt.

6.4.3 Modell-Inputs

6.4.3.1 Zielvariable Y_m

Die Zielvariable des Multilayer Perceptrons stellt eine Zeitreihe aus den Datenquellen der [destatis 2017] dar, welche prognostiziert werden soll. Basierend auf der Definition des Wirkfelds aus Abschnitt 6.3.3 wird die Zielvariable Y_m an das Multilayer Perceptron gegeben. Die Zeitreihe der Zielvariablen Y_m ist dabei definiert als ein T -dimensionaler Vektor mit den Zufallsvariablen y_1, y_2, \dots, y_T der Datenerhebung aus dem Wirkfeld. Die in der Zeitreihe enthaltenen Zufallsvariablen müssen aus reellen Zahlen $\{y_1^{(1)}, y_2^{(1)}, \dots, y_T^{(1)}\}$ bestehen. Die Zufallsvariablen müssen äquidistant erhoben worden sein. Die Vektorlänge T definiert sich dabei aus der verfügbaren Länge der Zeitreihen. Die Wirkfeld-Zeitreihe Y_m wird ab dem Jahr 1991 an das Multilayer Perceptron als Zielvariable (soweit die Daten bis dahin verfügbar sind) gegeben.

Die Menge zu betrachtender Zielvariablen definiert sich durch die im Wirkfeld A definierten Zeilen m . Es wird demnach eine Zeitreihe an das Multilayer Perceptron gegeben und ein Knoten ist in der Input-Schicht vorgesehen. Für jedes Wirkfeld wird ein eigenes Multilayer Perceptron erstellt (vgl. Abschnitt 6.4.2). Das hier definierte Prognoseverfahren generiert somit m Multilayer Perceptron Netze zur Prognose der Verkehrssicherheit.

6.4.3.2 Sicherheitspotentialzeitreihen R_n

Die Zeitreihen R_n der definierten risikometrischen Größe des Sicherheitspotentials $R(t)$ werden als Prädiktorvariablen an das Multilayer Perceptron Netz gegeben. Da die Zeitreihen des Sicherheitspotentials nur vom Zeitgang t abhängig sind, können diese für jede interessierende Prognoselänge bereitgestellt werden (vgl. Abschnitt 6.3.4). Die Zeitreihen des Sicherheitspotentials R_n definieren sich als ein $(T+G)$ -dimensionaler Vektor mit den Variablen r_1, r_2, \dots, r_{T+G} der Berechnung der Sicherheitspotentials durch $R(t)$ der betreffenden Maßnahme. Die Variablen der Sicherheitspotentialzeitreihe müssen äquidistant zu den Zeitreihen Y_m der Zielvariablen berechnet werden. Die Vektorlänge $T+G$ definiert sich dabei aus der verfügbaren Länge der Zeitreihen

der Zielvariablen T und dem gewünschten Prognosehorizont G . Die in der Zeitreihe enthaltenen Variablen der risikometrischen Größe müssen aus reellen Zahlen $\{r_1^{(1)}, r_2^{(1)}, \dots, r_{T+G}^{(1)}\}$ bestehen. Im Hinblick auf die Anforderungen in Abschnitt 6.1, möglichst viele rückliegende Daten an das Prognosemodell zu geben, wird die Wirkfeld-Zeitreihe Z_m ab dem Jahr 1991 an das Multilayer Perceptron Netz als Zielvariable gegeben.

Soweit die Maßnahme im Jahr 1991 nicht verfügbar war, muss für die Werte $\{r_1^{(1)}, \dots, r_{t_0}^{(1)}\}$ zum Zeitpunkt der Einführung der Maßnahme t_0 die Variable auf 1 gesetzt werden. Nach Erreichen der maximal erreichbaren Systempenetration zum Zeitpunkt t_i bis zum Endzeitpunkt der Prognose t_G wird der Variablenwert konstant auf dem minimal erreichbaren risikometrischen Wert gehalten $R(t)_{min}$.

Das Multilayer Perceptron Netz erhält entsprechend dem Wirkfeld A alle relevanten Prädiktorvariablen der Sicherheitspotentiale. Das Multilayer Perceptron Netz muss demnach in der Input-Schicht n -Knoten für die Prädiktorvariablen der Sicherheitspotentiale des Wirkfelds vorsehen.

6.4.3.3 Kausalzeitreihen X_o

Die Kausalzeitreihen X_o definieren sich als ein $(T+G)$ -dimensionaler Vektor mit den Zufallsvariablen x_1, x_2, \dots, x_{T+G} der Datenerhebung. Die Variablen der Kausalzeitreihen müssen äquidistant zu den Zeitreihen Y_m der Zielvariablen sein. Die Vektorlänge $T+G$ definiert sich dabei aus der verfügbaren Länge der Datenerhebung der Zeitreihen der Zielvariablen T und dem gewünschten Prognosehorizont G . Die in der Kausalzeitreihe enthaltenen Variablen müssen aus reellen Zahlen $\{x_1^{(1)}, x_1^{(1)}, \dots, x_{T+G}^{(1)}\}$ bestehen. Im Hinblick auf die Anforderungen in Abschnitt 6.1, möglichst viele rückliegende Daten an das Prognosemodell zu geben, müssen die Kausalzeitreihen X_o ab dem Jahr 1991 (soweit verfügbar) an das Multilayer Perceptron Netz als Kausalzeitreihen gegeben werden. Das Multilayer Perceptron Netz muss demnach in der Input-Schicht o -Knoten für die Prädiktorvariablen der Sicherheitspotentiale des Wirkfelds vorsehen.

Da die Kausalzeitreihen nicht für den gesamten Prognosehorizont bekannt sind, sondern nur bis zum aktuellen Zeitpunkt verfügbar, muss eine eigene Prognose für diese Zeitreihen erfolgen. Für die Prognose der Kausalzeitreihen ab dem Zeitpunkt t_T bis t_G wird ein GM(1,1) angewendet, welches bereits in Abschnitt 6.2.1.1 gute Ergebnisse für monotone Verläufe in Zeitreihen gezeigt hat. Die Daten der Kausalzeitreihen X_i bis X_o zeigen einen hinreichend monotonen Verlauf, so dass ein GM(1,1) plausibel angewendet werden kann: Sei $X_i^{(0)} = (x_i^0(1), \dots, x_i^0(T))$ eine Kausalzeitreihe der relevanten Kausalzeitreihen, welche prognostiziert werden sollen. Weiterhin sei $X_i^{(1)} = (x_i^{(1)}(1), \dots, x_i^{(1)}(T))$ die kumulierte Kausalzeitreihe von $X_i^{(0)}$. Die dritte für die Bestimmung des Grau-Modells notwendige Zeitreihe sei $Z_i^{(1)} = (z_i^{(1)}(1), \dots, z_i^{(1)}(T))$, die mittels folgendem Ausdruck berechnet wird:

$$z_i^{(1)}(k) = \frac{1}{2} (x_i^{(1)}(k) + x_i^{(1)}(k-1)) \quad (6.21)$$

Die Modellgleichung des GM(1,1) hat nach [Liu/Lin 2011: 107f.] folgende Form:

$$x_i^{(0)}(k) + a_i z_i^{(1)}(k) = b_i. \quad (6.22)$$

Um das Grau-Modell nun zu lösen, muss das Gleichungssystem $\hat{c}_i = (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T Y_i$ gelöst werden. Hierbei wird $\hat{c}_i = (a_i, b_i)^T$ auf zwei Elemente reduziert. Für B_i und Y_i gilt weiterhin

$$B_i = \begin{bmatrix} -z_i^{(1)}(2) & 1 \\ -z_i^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z_i^{(1)}(T) & 1 \end{bmatrix}, Y_i = \begin{bmatrix} x_i^{(0)}(2) \\ x_i^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x_i^{(0)}(T) \end{bmatrix}. \quad (6.23)$$

Die *Whitenization*-Gleichung des Grau-Modells lautet:

$$\frac{dx_i^{(1)}}{dt} + a_i x_i^{(1)} = b_i. \quad (6.24)$$

Die Lösung dieser Gleichung und damit auch die benötigte Berechnung für die neuen Werte sei

$$x_i^{(1)}(t) = \left(x_i^{(1)}(1) - \frac{b_i}{a_i} \right) e^{-a_i t} + \frac{b_i}{a_i}. \quad (6.25)$$

Damit folgt für die $k = 1, 2, \dots, n$ die Neuberechnung mittels der Formeln

$$\hat{x}_i^{(1)}(k+1) = \left(x_i^{(1)}(1) - \frac{b_i}{a_i} \right) e^{-a_i k} + \frac{b_i}{a_i}, \quad (6.26)$$

$$\hat{x}_i^{(0)}(k+1) = \hat{x}_i^{(1)}(k+1) - \hat{x}_i^{(1)}(k). \quad (6.27)$$

Dabei gibt $\hat{x}_i^{(0)}(k+1)$ den Output des GM(1,1) an. Es müssen mehr als die in T eingegebenen Werte berechnet werden, indem man $k = 1, 2, \dots, T + G$ angibt; wobei G die gewünschte Anzahl der Prognosewerte, bzw. den zukünftigen Zeithorizont angibt [Liu u. Lin 2011]. Demzufolge werden für alle Kausalzeitreihen die individuellen GM(1,1) Modelle bestimmt.

Das Multilayer Perceptron Netz muss entsprechend der identifizierten Kausalzeitreihen weitere zehn Knoten in der Input-Schicht vorsehen. Da die Kausalzeitreihen als Prädiktorvariablen an das Multilayer Perceptron Netz gegeben werden und bisher nur der Zeitschritt bis T bekannt war, müssen die Kausalzeitreihen X_i um die fehlenden Variablen entsprechend $X_i^{(0)} = (x_i^0(T+1), \dots, x_i^0(G))$ von t_T bis t_G ergänzt werden.

6.4.4 Toolgestützte Durchführung der Wirkungsprognose

Die Realisierung des im Abschnitt 6.4.2 definierten Algorithmus zur Umsetzung des Multilayer Perceptron Netzes erfolgt mit dem Tool Matlab. Dabei wird die „*Neuroal Network Toolbox*“ und „*Genetic Algorithm Optimization Toolbox*“ (GAOT) genutzt, um die jeweiligen Arbeitsschritte des Algorithmus zu vollziehen. Die Bestimmung der Gewichtungen und Schwellenwerte des Multilayer Perceptron Netzes erfolgt dabei nach dem Verfahren des Real-Codings nach [Qin, 2006].

Im Folgenden wird kurz erläutert, welche Arbeitsschritte mit Matlab durchgeführt wurden. Das Vorgehen ist für jede definierte Zielvariable Y_1 bis Y_{16} erneut anzuwenden. Demnach werden

im Rahmen der exemplarischen Anwendung 16 neuronale Netze zur Prognose der jeweiligen Unfallaufkommen in den betreffenden Wirkfeldern erstellt.

- *Importieren der Input-Daten*

Zum Importieren der Zeitreihen wird der Vektor der Zielvariablen Y_m des zu prognostizierenden Wirkfelds eingelesen. Entsprechend der Wirkfeldmatrix A werden alle Prädiktorvariablen der Sicherheitspotentialzeitreihen R_n der Kausalzeitreihen X_o eingelesen. Entsprechend den Anforderungen (vgl. Abschnitt 6.1) soll an das Netz die maximal verfügbare Menge an konsistenten Daten gegeben werden. Soweit verfügbar werden demnach alle Zeitreihenvektoren ab dem Jahr 1991 im Jahresgang eingelesen. Wenn hinsichtlich der Zielvariablen in der Unfalldatenbank nicht alle Jahre ab 1991 bekannt sind, muss sichergestellt werden, dass alle Zeitreihenvektoren mit der gleichen Länge importiert werden.

- *Prognose der Kausalzeitreihen mittels $GM(1,1)$*

Die Kausalzeitreihen liegen in einem nicht ausreichenden Zeithorizont vor, da sie als Prädiktorvariablen genutzt werden. Daher wird entsprechend dem definierten $GM(1,1)$ -Modell aus Abschnitt 6.4.3.3 die Prognose der Kausalzeitreihen X_o vom Zeitpunkt tr bis t_G vorgenommen. Nach Durchführung der Prognose muss für jeden Vektor X_o der Kausalzeitreihen ein neuer Vektor der Länge t_o bis t_G gebildet werden. Die im Vektor enthaltenen Werte von t_o bis tr entsprechen den originären Zeitwerten der Kausalzeitreihen und die Werte von t_{tr+1} bis t_G entsprechen den Berechnungen des $GM(1,1)$.

- *Daten-Normierung*

Das neuronale Netzwerk benötigt die Werte der verfügbaren Zeitreihen als normierte, dimensionslose Größen. Hierzu wird die Z-Transformation auf die Input-Daten angewendet. Dies ist notwendig, um unterschiedlich verteilte Zufallsvariablen der Input-Vektoren miteinander vergleichen zu können. Nachdem die Prognose durch das neuronale Netz erstellt ist, werden die Daten rückwärtsnormalisiert.

- *Initialisierung des Multilayer Perceptron Netzes*

Zur Umsetzung des neuronalen Netzwerks wird die relevante Toolbox genutzt. Mittels der *nninit*-Funktion wird das neuronale Netzwerk erstellt. Es wird der Vektor Y_m als Zielvariable definiert. Es werden die Sicherheitspotentialzeitreihen R_n und die Kausalzeitreihen X_o als Prädiktorvariablen deklariert, vgl. Abschnitt 7.3.

- *Training des Multilayer Perceptron Netzes*

Das im vorherigen Schritt durch den GA optimierte Netz wird dem Training unterzogen und erneut ausgebildet. Dabei wird eine 70/15/15 Verteilung für das Netztraining vorgenommen. Hierbei werden 70% des verfügbaren Datensatzes zu Trainingszwecken genutzt, weitere 15% werden jeweils zu Test- und Validierungszwecken genutzt. Das Training des Netzwerks wird über die Funktion *net=train(net,pn,tn)* aufgerufen.

- *Optimierung der Gewichtungen und Schwellenwerte mittels GA*

Die Optimierung der Gewichtungen und Schwellenwerte des erstellten Multilayer Perceptron Netzes erfolgt mit der GAOT-Toolbox. Zur Durchführung des optimierten Lernverfahrens werden die Funktionen *initializega.m* und *ga.m* genutzt. Die Optimierung der Gewichtungen und Schwellenwerte des erstellten Neuronalen Netzes werden durch diese Funktionen vorgenommen. Dabei folgt das Vorgehen dem definierten Algorithmus aus Abschnitt

6.4.2. Sobald das Optimum gefunden wurde, kann die Konfiguration der Netzwerkparameter erfolgen.

- *Konfiguration der Netzwerkparameter*

Basierend auf den optimierten Parametern der Gewichtungen und Schwellenwerte durch den genetischen Algorithmus werden durch die Funktion *gadecod* die Änderungen im Multilayer Perceptron Netz umgesetzt. Daraufhin wird das Multilayer Perceptron Netz erneut erstellt mit den angepassten Netzwerkparametern.

- *Durchführung der Prognose*

Nachdem der genetische Algorithmus die optimalen Netzparameter identifiziert hat, werden die Ergebnisse der Prognose rückwärtsnormalisiert wieder als Zeitreihen-Vektor bereitgestellt. Der hier vorgenommene Prognosehorizont G wird auf 20 Jahre angesetzt. Demzufolge können Implikationen für den Trend der Verkehrssicherheit von 2016 bis 2026 getroffen werden.

7 Exemplarische Anwendung

"Der Fehler ist für das Engineering von zentraler Bedeutung. Jede einzelne Berechnung, die ein Ingenieur vornimmt, ist eine Fehlerrechnung. Bei erfolgreichem Engineering geht es darum zu verstehen, wie Dinge ausfallen oder versagen.

(Henry Petroski)

Dieses Kapitel befasst sich mit der exemplarischen Anwendung des definierten Prognoseverfahrens (siehe Abschnitt 6.4) zur modellbasierten Prognose der Verkehrssicherheit. In Abschnitt 7.1 wird der verwendete Maßnahmenkatalog beschrieben. Der sich anschließende Abschnitt 7.2 deklariert die verwendete Unfalldatenbank. Daraufhin werden aus dem Maßnahmenkatalog und der Unfalldatenbank die notwendigen Prognosemodell-Inputs bestimmt, siehe Abschnitt 7.3. Die Ergebnisse der Prognose werden in Abschnitt 7.4 ausführlich diskutiert und in Abschnitt 7.5 die sich schließenden Implikationen für die Entscheidungsträger formuliert. Dieses Kapitel endet mit einem Ausblick auf den erwarteten Sicherheitsnutzen des hochautomatisierten Fahrens, vgl. Abschnitt 7.6.

7.1 Maßnahmenkatalog

Im Rahmen der Vorarbeiten dieser Arbeit wird der Maßnahmenkatalog von [Grune 2016] als Modell-Input genutzt. Der Maßnahmenkatalog von [Grune 2016] wurde spezifisch für die gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 6.1) der zugrundeliegenden Forschungsfrage entwickelt. Der Maßnahmenkatalog dient in erster Linie dazu, die verschiedenen Maßnahmen an den Verkehrsmitteln, -objekten, -infrastruktur und -organisation (vgl. Anf_o3 bis Anf_o6) zu objektivieren und zu vereinheitlichen. Demnach müssen die zentralen Inhalte des Katalogs die folgenden Attribute für Verkehrssicherheitsmaßnahmen abbilden:

- Bezeichnung der Maßnahme [dmnl]
- Einführungszeitpunkt [Jahr]
- Funktionsbeschreibung [dmnl]
- Wirkungsfeld [Zeitreihen Y_t]
- Anzahl relevanter Unfälle [N]
- Sicherheitsgewinn [n/N]
- Systempenetration [%]
- Auswirkungen vollständiger Umsetzung [n]

Die Inhalte des Maßnahmenkatalogs können sich primär aus den Ergebnissen der verschiedenen Wirkungsanalysen ergeben, vgl. Abschnitt 4.4. So definieren die simulationsbasierten Wirkungsanalysen zumeist einen Sicherheitsgewinn in der Form, dass aus dem adressierten Wirkungsfeld ermittelt wird, wie viele Unfälle durch den Einsatz der Maßnahme reduziert werden können. Dies trifft insbesondere für die Betrachtung verkehrsmittelseitiger Maßnahmen zu [Busch 2005]

[Kohsiek et.al. 2011]. Die Quellen für Maßnahmen an anderen Verkehrskonstituenten können u. a. Expertenbefragungen oder weitere simulationsgestützte Wirkungsanalysen darstellen. Die weiteren notwendigen Informationen zu einer Maßnahme stellen den aktuellen Grad der Systempenetration dar (wie viele Verkehrsmittel sind mit der Maßnahme ausgestattet; wie viele Verkehrsobjekte erreicht die Maßnahme), und das Wirkfeld muss sich daran definieren, welche Unfallzeitreihen X_i durch die Maßnahme avisiert werden.

Die methodische Struktur des Maßnahmenkatalogs orientiert sich dabei an dem vorgeschlagenen Implementierungskonzept zur Verfeinerung von Ressourceneigenschaften von Verkehrssicherheitsmaßnahmen nach [Schnieder u. Schnieder 2013]. Im Folgenden werden kurz die erhobenen Maßnahmen im Maßnahmenkatalog benannt und identifiziert. Die Identifizierung der Maßnahmen ist erforderlich, da die von [Grune 2016] vorgeschlagene Codierung der Bezeichnungen für die weitere Anwendung der Verkehrssicherheitsprognose verwendet wird: Insgesamt hat der Maßnahmenkatalog von [Grune 2016] 133 unterschiedliche Verkehrssicherheitsmaßnahmen für die vier Verkehrskonstituenten identifiziert und entsprechend den definierten Attributen 87 Maßnahmen quantifiziert. Der Katalog erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Das definierte Datenblatt im Maßnahmenkatalog enthält dabei die folgenden Attribute:

- *Bezeichnung der Maßnahme:* Bezeichnung der jeweiligen Maßnahme mit gängigen Abkürzungen.
- *Einführungszeitpunkt im Verkehrssystem t_0 :* Hierin wird der Zeitpunkt t_0 erfasst, zu dem die Maßnahme das erste Mal im Verkehrssystem eingeführt wurde (Systempenetration).
- *Beschreibung der Funktionalität der Maßnahme:* In der Funktionsbeschreibung werden das Ziel und die Umsetzung der jeweiligen Maßnahme natürlichsprachlich beschrieben.
- *Wirkfeld:* Hierin wird eine Auflistung der relevanten Unfallursachen aufgelistet, auf welche die jeweilige Maßnahme wirken soll. Gleichfalls werden im Wirkfeld die relevanten Zeitreihen des Datensatzes der Unfalldatenbank benannt (vgl. Abschnitt 6.3.3)
- *Anzahl relevanter Unfälle:* Die Zeile ‚Anzahl relevanter Unfälle‘ stellt den summierten Wert der relevanten Unfälle im betreffenden Wirkfeld dar. Die Anzahl der relevanten Unfälle bezieht sich ausschließlich auf Unfälle mit Personenschäden; Sachschäden werden nicht betrachtet
- *Sicherheitsgewinn:* Der Sicherheitsgewinn beinhaltet das in dieser Arbeit definierte Maß zur Bestimmung des erwarteten Sicherheitsgewinns einer Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.3.1)
- *Systempenetrationsgrad:* Die Zeile der Systempenetration gibt den prozentualen Anteil einer Maßnahme im Verkehrssystem an. Da nicht zwischen verkehrsmittel-, verkehrsobjekt- oder verkehrsinfrastrukturseitigen Maßnahmen unterschieden wird, wird bei der Bestimmung der Systempenetration jeweils eine sinnvolle Bezugsgröße gewählt. Besteht bspw. in Deutschland eine gesetzliche Pflicht zur Umsetzung einer Maßnahme (z. B. neue Inhalte der Fahrschul Ausbildung oder Geschwindigkeitsgrenze auf Autobahnen), so wird die Systempenetrationsrate mit 100% angenommen.
- *Zustandsübergänge der Maßnahme im Sicherheitszyklus:* Hierin wird gezeigt, welche Art des Zustandsübergangs entsprechend dem von [Schnieder u. Schnieder 2013] definierten Sicherheitszyklus die Verkehrssicherheitsmaßnahme vornimmt
- *Pflichtstatus in Deutschland:* Der gesetzliche Aspekt der Umsetzungspflicht einer Maßnahme ist nur bei Verkehrsmitteln relevant. Es wird unterschieden, ob eine Umsetzungspflicht besteht, ob die Hersteller sich freiwillig verpflichtet haben oder ob keine Einbaupflicht besteht
- *Aktive oder passive Wirkungsweise:* Entsprechend der Definition der aktiven oder passiven Sicherheitswirkung der Verkehrssicherheitsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 2.1) wird hier bei den

Maßnahmen differenziert, ob sie mindernd auf die Eintrittswahrscheinlichkeit des im Wirkungsfeld enthaltenen Unfallgeschehens einwirken, oder die Unfallschweren verbessern

Der Maßnahmenkatalog nach [Grune 2016] erarbeitet noch weitere Attribute zu den Maßnahmen: die *psychologische Wirkung auf den Menschen* und die möglichen *Fehlfunktionen* der Maßnahmen. Diese Attribute sind dahingehend intendiert, dass sie eine Aussage treffen können, ob eine Maßnahme auch einen risikoförderlichen Aspekt, z. B. durch missbräuchliche Nutzung, aufweist. Entsprechend der gesetzten Anforderung (vgl. Abschnitt 6.1) wird der Aspekt der möglichen entgegengesetzten Wirkungen der Sicherheit hier nicht weiter diskutiert.

Eine Zielsetzung bei der Erstellung des Katalogs bestand darin, die im Maßnahmenkatalog erhobenen Daten der Attribute mit belegbaren Literaturrecherchen zu belegen. Dies konnte leider nicht vollständig erreicht werden. Daher ist anhand der erhobenen Maßnahmen im Katalog zu erkennen, dass nicht konsequent alle notwendigen Attribute bestimmt werden können, um die Parameter zur Bestimmung der Sicherheitspotentialkurven zu bestimmen. Es wird im Rahmen dieser Arbeit der Anspruch erhoben, dass nur belegbare Parameter für die Prognose der Verkehrssicherheit genutzt werden. Daher ist eine Qualifizierung der verfügbaren Maßnahmen im Maßnahmenkatalog notwendig (vgl. Abschnitt 7.1.5). Eine Auflistung der im Katalog enthaltenen Maßnahmen ist im Anhang F angefügt.

7.1.1 Verkehrsmittelseitige Maßnahmen

Verkehrsmittelseitige Maßnahmen definieren sich entsprechend den Einflussfaktoren seitens technischer Ressourcen in Verkehrsmitteln. Die Maßnahmen können demnach materiell, konstruktiv oder formgebend sowie physikalisch oder informativ sein. [Grune 2016] konnte insgesamt 33 verkehrsmittelseitige Maßnahmen zur Steigerung der Verkehrssicherheit identifizieren. Grune hat hier primär aktive (z. B. Notbremsassistent VO₂₄) und passive Maßnahmen (z. B. Kopfairbags VO₆) im Verkehrsmittel erfasst. Die Identifikation für die Maßnahmen an den Verkehrsmitteln lautet „VM_{*i*}“, mit *i* als laufenden Index.

Die Maßnahmen in den Verkehrsmitteln stellen nominell die größte Gruppe an Maßnahmen im Verkehrssystem dar. Keine der weiteren Verkehrskonstituenten weist so viele unterschiedliche Maßnahmen zur Steigerung der Verkehrssicherheit auf. Die vollständige Liste der verfügbaren verkehrsmittelseitigen Maßnahmen ist im Anhang F enthalten.

7.1.2 Verkehrsobjektseitige Maßnahmen

Verkehrsobjektseitige Maßnahmen sehen Verkehrssicherheitsmaßnahmen an den Verkehrsobjekten vor. Diese Maßnahmen zielen auf die Verbesserung der individuellen Fahrerfähigkeiten ab (vgl. Abschnitt 2.2.1). [Grune 2016] konnte für diesen Verkehrskonstituenten 11 Maßnahmen identifizieren und quantifizieren. Zu den identifizierten Maßnahmen gehören Beispiele wie das begleitete Fahren mit 17 (VM₂) oder Fahrsicherheitstrainings (VM₃). Die Identifikation für die Maßnahmen an den Verkehrsmitteln lautet „VO_{*i*}“, mit *i* als laufenden Index.

Die Maßnahmen an den Verkehrsobjekten stellen nominell die zweitgrößte Gruppe an Maßnahmen im Verkehrssystem dar. Die vollständige Liste der verfügbaren verkehrsobjektseitigen Maßnahmen ist im Anhang F enthalten.

7.1.3 Verkehrsinfrastrukturseitige Maßnahmen

Hinsichtlich der Erhebung der verkehrsinfrastrukturseitigen Maßnahmen differenziert der Katalog von [Grune 2016] nach technischen und baulichen Maßnahmen, da hier jeweils Anpassungen im Datenblatt notwendig waren, vgl. [Grune 2016].

Technische Maßnahmen der Verkehrsinfrastruktur

Technische Maßnahmen in der Verkehrsinfrastruktur sehen primär Maßnahmen aus dem Bereich der Verkehrsleittechnik vor. [Grune 2016] konnte 6 technische Maßnahmen in der Infrastruktur identifizieren. Die Identifikation für die technischen Maßnahmen an der Verkehrsinfrastruktur lautet „Vlt i “, mit i als laufenden Index. Beispiele für diesen Maßnahmentyp sind die automatischen Geschwindigkeitsregelanlagen auf Autobahnen (Vlt₁) oder auch fest installierte Geschwindigkeitskontrollen (Vlt₂). Die technischen Maßnahmen an Verkehrsinfrastruktur stellen nominell die zweitkleinste Gruppe an Maßnahmen im Verkehrssystem dar. Die vollständige Liste der verfügbaren technischen verkehrsinfrastrukturseitigen Maßnahmen ist im Anhang F enthalten.

Bauliche Maßnahmen der Verkehrsinfrastruktur

Bauliche Maßnahmen in der Verkehrsinfrastruktur sehen bauliche Maßnahmen zur Verbesserung und Erhaltung der Verkehrsinfrastruktur vor. [Grune 2016] konnte 5 bauliche Maßnahmen in der Infrastruktur als dedizierte Verkehrssicherheitsmaßnahmen identifizieren. Die Identifikation für die baulichen Maßnahmen an der Verkehrsinfrastruktur lautet „Vlb i “, mit i als laufenden Index. Beispiele für bauliche Verkehrsinfrastrukturmaßnahmen sind u. a. reduzierte Geschwindigkeitsbegrenzungen (Vlb₁) oder die bereits im Abschnitt 2.1.2 benannten Shared Spaces (Vlb₄).

Die baulichen Maßnahmen an Verkehrsinfrastruktur stellen nominell die kleinste Gruppe an Maßnahmen im Verkehrssystem dar. Die vollständige Liste der verfügbaren baulichen verkehrsinfrastrukturseitigen Maßnahmen ist im Anhang F enthalten.

7.1.4 Verkehrsorganisationsseitige Maßnahmen

Die letzte Gruppe der von [Grune 2016] erhobenen Maßnahmen stellen die verkehrsorganisationsseitigen Maßnahmen dar. Dabei sind Maßnahmen seitens der Verkehrsorganisation so zu verstehen, dass z. B. Politik oder am Verkehrsgeschehen beteiligte Organisationen (z. B. Verkehrsclubs) Maßnahmen ergreifen. [Grune 2016] konnte 10 Maßnahmen seitens der Verkehrsorganisationen identifizieren. Die Identifikation für die Maßnahmen seitens der Verkehrsorganisation lautet „VOrg i “, mit i als laufenden Index. Zu den Beispielen im Katalog zählen Maßnahmen wie der eCall (VOrg₂) oder die Vorschriften der Straßenverkehrsordnung (VOrg₈).

Die Maßnahmen seitens der Verkehrsorganisation stellen nominell die drittgrößte Gruppe an Maßnahmen im Verkehrssystem dar. Die vollständige Liste der verfügbaren verkehrsorganisationsseitigen Maßnahmen ist im Anhang F enthalten.

7.1.5 Eingrenzung der betrachteten Maßnahmen

Wie bereits erwähnt, enthält der Maßnahmenkatalog von [Grune 2016] nicht für jede Maßnahme alle erforderlichen Parameter zur Bestimmung des Sicherheitspotentials. Daher kommt eine wesentlich geringere Menge an Maßnahmen tendenziell infrage, für die Prognose der Verkehrssicherheit angewendet zu werden, 23 der 87 identifizierten Maßnahmen weisen grundlegend die

erforderlichen Attribute auf. Insbesondere bei den Werten hinsichtlich der Systempenetration sind die Maßnahmen für die Verkehrsinfrastruktur und -organisation schwer zu bestimmen. Bei zum Beispiel baulichen Verkehrssicherheitsmaßnahmen müsste bestimmt werden, anhand wie vieler relevanter infrastruktureller Einrichtungen die Sicherheitsmaßnahme umgesetzt worden ist (z. B. Anzahl von Notrufsäulen im relevanten Wirkfeld). Die Bestimmung des Sicherheitspotentials ließe sich hier in Anlehnung das von der FGSV vorgeschlagene Sicherheitspotential bestimmen [FGSV 2003]. Hinsichtlich der Marktpenetration von organisationsseitigen Maßnahmen hatte [Grune 2016] Schwierigkeiten, das Maß der Systempenetration einheitlich anzuwenden. Organisatorische und verkehrsobjektseitige Maßnahmen sind im Katalog mit einer Penetrationsrate von 100% aufgeführt, da Sie umgehend umgesetzt werden. Gerade bei dieser Art von Verkehrssicherheitsmaßnahmen stellt sich die Frage, wie vorgabekonform diese im Verkehrssystem umgesetzt werden.

Von der theoretischen Basis der Prognosemethode her kann angenommen werden, dass aufgrund der normierten Parameter t_0 , $M(t)$ und S alle Maßnahmentypen in die Prognose eingebunden werden können. Der aktuell vorhandene Maßnahmenkatalog differenziert nicht ausreichend bei der Marktpenetration und dem Sicherheitspotential für die weiteren Verkehrskonstituenten. Alle im Katalog enthaltenen Daten sind auf Basis von Forschungsarbeiten belegbar. Die Forschungsarbeiten zu den Sicherheitspotentialen nicht-verkehrsmittelseitiger Maßnahmen sind bisher nicht ausreichend, um Daten für diese Arbeit zu nutzen. Daher schränkt sich die Menge an für die exemplarische Anwendung nutzbaren Maßnahmen im Katalog auf die verkehrsmittelseitigen Maßnahmen ein. Die ausgewählten Maßnahmen für die exemplarische Anwendung mit den Parametern t_0 , $M(t)$ und S sind in der folgenden Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Verkehrsmittelseitige Maßnahmen mit ausreichender Datenbasis, in Anlehnung an [Grune 2016]

ID	Maßnahme	t_0	$M(t)$	S
VM_2	Adaptive Cruise Control (ACC)	1992	5% (2015)	17%
VM_5	Frontairbag für Fahrer und Beifahrer	1982	98% (2013)	70%
VM_6	Kopfairbag	1998	57% (2013)	62%
VM_10	Aufstellbare Fronthaube	2007	2% (2013)	25%
VM_12	Tagfahrlicht	2003	21% (2013)	3%
VM_13	Aufmerksamkeitsassistent	2007	6% (2015)	20%
VM_14	Einparkassistent	1982	8% (2015)	30%
VM_15	Elektronische Stabilitätskontrolle	1995	70% (2015)	80%
VM_23	Nachtsicht-Assistent	2001	6% (2015)	40%
VM_24	Notbremsassistent	2000	1% (2015)	6%
VM_25	Reifendruckkontrollsystem	2013	5% (2015)	28%
VM_29	Sicherheitsgurt-Warnsystem	1950	98% (2014)	70%
VM_31	Totwinkel-Assistent	2005	4% (2015)	26%

7.2 Unfalldatenbank

Die Zeitreihenaufbereitung muss sicherstellen, dass die Zeitreihen für den größtmöglichen Zeitraum konsistent sind. Insbesondere bei der deutschen Verkehrsstatistik ergibt sich durch die Wende Anfang der 1990er Jahre ein Sprung in der Statistik, welcher nicht primär durch ein erhöhtes Unfallaufkommen, sondern um die Erweiterung des erfassten Unfallereignisraumes zu erklären ist (vgl. Abschnitt 1.1). Weiterhin müssen Unterschiede in den Diskretisierungsabständen berücksichtigt werden. So beinhalten die „Zeitreihen Verkehr“ der [destatis 2017] seit 2003 z. T. Monatsgänge, es muss gleichzeitig sichergestellt werden, dass aber auch die Prädiktorvariablen des Multilayer Perceptron Netzes äquidistant zu den Zielvariablen sind. Im Hinblick auf die Bewertung unterschiedlicher Verkehrssicherheitsmaßnahmen wird im Rahmen der an das Prognosemodell gegebenen Zeitreihen u. U. eine Selektion hinsichtlich des Wirkfelds der Maßnahme erforderlich sein. Nicht jede getroffene Maßnahme wird einen Einfluss auf jede erfasste Unfallzeitreihe aufweisen.

Die Unfalldatenbank stellt den primären Modell-Input für die Zielvariablen (vgl. Abschnitt 6.4.3.1) bereit. Da im Rahmen dieser Arbeit eine öffentlich verfügbare Unfalldatenbank genutzt werden soll und kein Zugang zur GIDAS besteht, werden im Folgenden die verfügbaren Datenquellen und die Eingrenzung der relevanten Wirkfelder A auf Basis der in Abschnitt 7.1.5 eingegrenzten Maßnahmen für die Prognose der Verkehrssicherheit vorgenommen. Die folgende Unfalldatenbank wird in der Arbeit verwendet (siehe Tabelle 7-2):

Tabelle 7-2: Identifizierung der verwendeten Unfalldatenbank

Bezeichnung	Verkehrsunfälle – Zeitreihen 2015	Datenbankgröße	70,346 KB
Dateiname	VerkehrsunfaelleZeitreihenXLS_5462403.xls	Quelle	https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleZeitreihen.html
Dateiformat	Excel		
Datum	12. Juli 2016 ¹¹		
Artikelnummer	5462403157005		

7.3 Bestimmung der Modell-Inputs

7.3.1 Zielvariablen Y_m

Die vorgenommene Auswahl der zu prognostizierenden Zielvariablen ist anhand der in der Unfalldatenbank vorhandenen Wirkfelder strukturiert und begründet:

1. *Infrastrukturspezifische Wirkfelder:* Innerhalb der infrastrukturspezifischen Wirkfelder soll das Unfallaufkommen mit Getöteten innerhalb und außerhalb von Ortschaften, auf Autobahnen, auf Bundesstraßen und Kreisstraßen betrachtet werden. Diese Sichtweise entspricht auch der in der Einleitung vorgestellten jährlichen Statistik der [destatis 2017] (vgl. Tabelle

¹¹ Ergänzt in den Tabellen 10 und 12 durch die destatis am 12. Oktober 2016.

- 1-1) zur Verkehrssicherheitslage in Deutschland. Die benannten Wirkfelder werden eine Differenzierung des Verkehrsunfallaufkommens für die Implikationen bereitstellen.
2. *Wirkfelder mit Verkehrsmodenübergängen:* Im Wirkfeld mit Transportmodenübergängen sollen die Unfälle mit Getötetenfolge an Fußgängerüberwegen und Bahnübergängen prognostiziert werden. Entsprechend der Auswahl der verfügbaren verkehrsmittelseitigen Assistenzsysteme ist hier die Fragestellung zu adressieren, ob Maßnahmen, wie der Notbremsassistent, im Wirkfeld Fußgängerüberweg eine prognostizierbare Sicherheitswirkung aufweisen können.
 3. *Witterungsbedingte Wirkfelder:* Hinsichtlich der witterungsbedingten Wirkfelder sollen verschiedene Lichtverhältnisse, wie auch Niederschlagsverhältnisse (Nebel) betrachtet werden. Auch diese Auswahl kann mit den verfügbaren Maßnahmen im Katalog begründet werden. Es wird getestet, inwieweit durch vermehrten Einsatz von Assistenzsystemen, wie dem ACC (VM2), eine Veränderung der Sicherheit durch das Prognosemodell erkennbar ist.¹²
 4. *Ursachenspezifische Wirkfelder:* Die ursachenspezifischen Wirkfelder sollen die Zeitreihen des Unfallaufkommens durch Übermüdung, Alkoholeinfluss sowie Unfälle mit Baumaufprall und Wild beinhalten. Diese vier Typen werden einerseits von den verkehrsmittelseitigen direkt adressiert (z. B. Unfälle durch Übermüdung durch den Aufmerksamkeitsassistenten), andererseits gilt weiterhin die Baumkollision auf Landstraßen als ein zentraler Typ von tödlichen Unfällen.

Die Codierung der Zielvariablen (vgl. Abschnitt 6.4.3.1) ist in Tabelle 7-3 aufgeführt.

Tabelle 7-3: Codierung der Wirkfelder der Unfalldatenbank als Zielvariablen

ID	Bezeichnung	ID	Bezeichnung
Y₁	Außerhalb von Ortschaften	Y₉	Tageslicht
Y₂	Innerhalb von Ortschaften	Y₁₀	Dämmerung
Y₃	Autobahn	Y₁₁	Dunkelheit
Y₄	Baustellenbereich	Y₁₂	Nebel
Y₅	Bundesstraße	Y₁₃	Übermüdung
Y₆	Kreisstraße	Y₁₄	Alkoholeinfluss
Y₇	Fußgängerüberweg	Y₁₅	Baumaufprallunfälle
Y₈	Bahnübergang	Y₁₆	Wildunfälle

Entsprechend den relevanten Verkehrssicherheitsmaßnahmen aus Abschnitt 7.1.5 sowie der soeben vorgenommenen Eingrenzung relevanter Zeitreihen aus der Unfalldatenbank (basierend auf dem Maßnahmenkatalog nach [Grune 2016]) kann die folgende Zuordnung zwischen den Verkehrssicherheitsmaßnahmen VM_i und den verfügbaren Zielvariablen Y_m aus der Unfalldatenbank aufgestellt werden:

¹² Im Abschnitt 2.1 konnte gezeigt werden, dass z. B. das ACC vermehrt bei Nebelfahrten Einsatz findet, hierdurch kann ggf. getestet werden, ob das Prognosemodell auch sicherheitsaverse Effekte bestimmen kann.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} VM2 & VM5 & VM6 & VM10 & VM12 & VM13 & VM14 & VM15 & VM23 & VM24 & VM25 & VM29 & VM31 \end{matrix} \\ \begin{matrix} Y1 \\ Y2 \\ Y3 \\ Y4 \\ Y5 \\ Y6 \\ Y7 \\ Y8 \\ Y9 \\ Y10 \\ Y11 \\ Y12 \\ Y13 \\ Y14 \\ Y15 \\ Y16 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7.1)$$

mit

- o: kein Einfluss der Maßnahme im Wirkfeld
- 1: Maßnahme hat Einfluss im Wirkfeld

Jede Zeile der Matrix 7.2 zeigt somit die im Wirkfeld verorteten Maßnahmen (vgl. Abschnitt 6.3.3). Für jede Zielvariable wird ein individuelles Multilayer Perceptron Netz erstellt mit den jeweiligen Sicherheitspotentialzeitreihen der im Wirkfeld enthaltenen Verkehrssicherheitsmaßnahmen.

7.3.2 Sicherheitspotentiale R_i

Entsprechend dem in der Entwicklung Sicherheitspotential (siehe Abschnitt 6.3) werden die Zeitreihen der Sicherheitspotentiale aus den Variablen t , $M(t)$ und S gebildet. Die Parametrierung der Variablen p , q und m stellen hierbei ein Optimierungsproblem dar. Dieses Optimierungsproblem wurde im Rahmen der exemplarischen Anwendung mittels eines genetischen Algorithmus (vgl. Abbildung 6-26) bestimmt. Dabei optimiert der GA soweit die Parameter, bis die Kurven optimal durch die kurvendefinierenden Punkte laufen. Die Sicherheitspotentialzeitreihen $R_i(t)$ sind in der folgenden Abbildung 7-1 dargestellt. Die dort gewählte Darstellung bestimmt die Sicherheitspotentialzeitreihen $R_i(t)$ ab dem Zeitpunkt 1991 zurück. Man kann anhand der Kurvenverläufe erkennen, wie unterschiedlich sich die Systempenetrationsraten entwickeln und gleichzeitig, dass nicht alle Sicherheitspotentiale final die gleiche Risikoreduktion im Verkehrssystem erreichen. Diese Informationen der künftig erwarteten Entwicklung werden somit dem Multilayer Perceptron Netz übergeben.

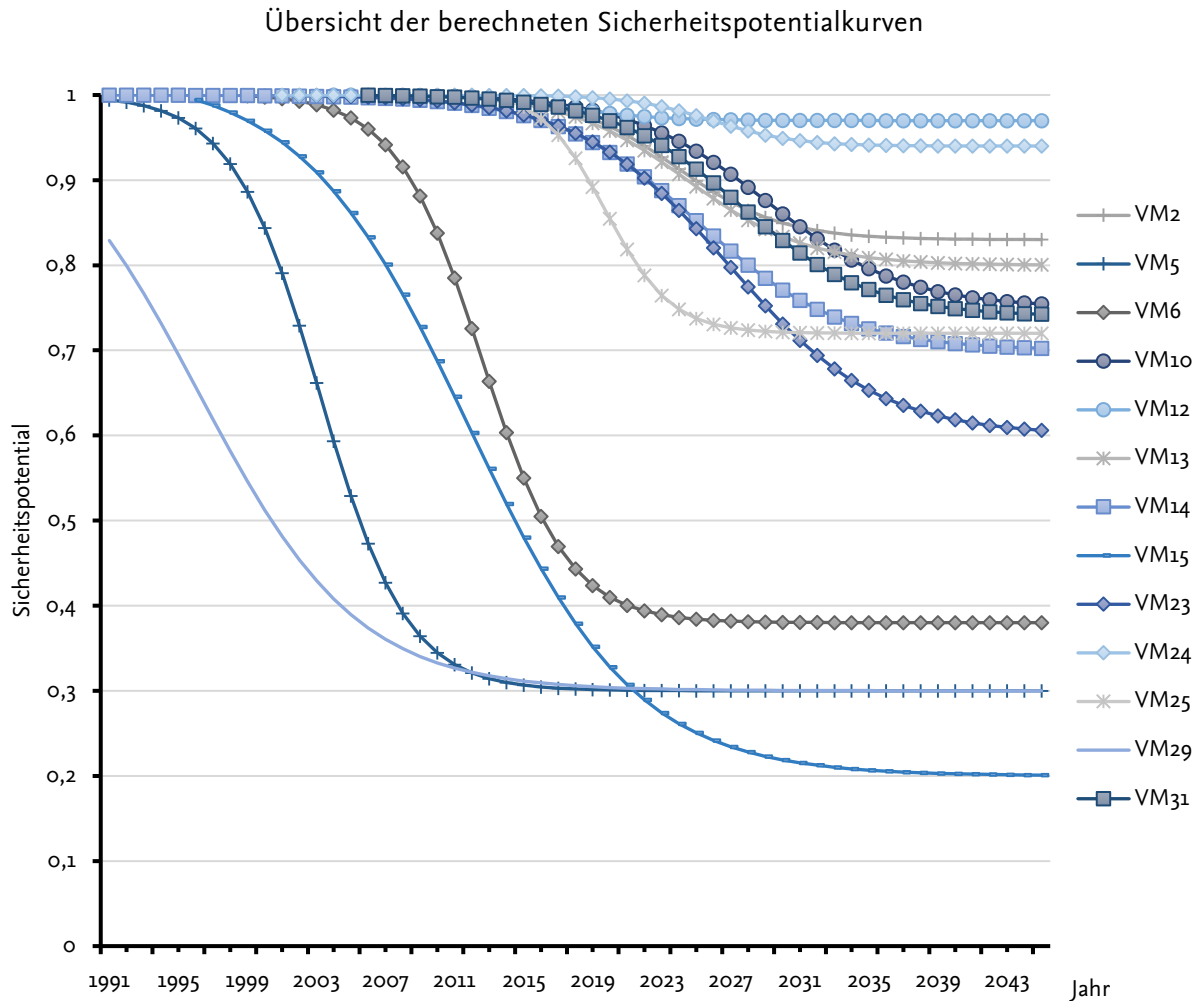


Abbildung 7-1: Sicherheitspotentialzeitreihen der relevanten Maßnahmen

Die Sicherheitspotentialzeitreihen $R_i(t)$ können als Vektoren an das Prognosemodul übergeben werden und als Prädiktorvariablen für das Multilayer Perceptron Netz dienen.

7.3.3 Kausalzeitreihen X_0

Grundlegend können zahlreiche Kausalitäten in den Zeitreihen hinsichtlich der Verkehrssicherheit gefunden werden. [Elvik 2014] stellt hier einige typische Indikatoren vor, welche einen korrelativen Zusammenhang zum Verkehrsunfallgeschehen aufweisen. Übertragen auf die avisierten Systemgrenzen kann man 17 Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit benennen, vgl. Anhang G. Mit dem Ziel die an das Multilayer Perceptron Netz zu gebenden Kausalzeitreihen zu minieren, wird im Folgenden eine Korrelations- und Signifikanzanalyse nach Pearson der Zeitreihen vorgenommen, um eine plausible Auswahl der Zeitreihen vorzunehmen: Der Korrelationskoeffizient r nach Pearson für die Bestimmung der Korrelation von zwei Zeitreihen x und y definiert sich entsprechend folgendem Ausdruck:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7.2)$$

Der Korrelationskoeffizient r wird entsprechend für alle Paarungen der Zeitreihen $X_1 \times X_{17}$ berechnet. Neben dem Korrelationskoeffizienten ist die Bestimmung der Signifikanz α relevant.

Die Signifikanz ist ein statistisches Maß, welches die Wahrscheinlichkeit eines systematischen Fehlers in dem Zusammenhang zwischen zwei Zeitreihen beschreibt. Die Signifikanz gibt die Irrtumswahrscheinlichkeit der zu testenden Hypothese an. Im Rahmen dieser Signifikanzanalyse der potentiellen Kausalzeitreihen wird die gängige Praxis übernommen, dass bei α -Werten größer als 0,05 die Korrelation der Faktoren nicht ausreichend hoch ist und angenommen wird, dass kein korrelativer Zusammenhang besteht. Deshalb werden solche Kausalzeitreihen nicht übernommen. Weiterhin wird eine Hauptkomponentenanalyse der benannten Kausalzeitreihen durchgeführt, um eine Eingrenzung der abhängigen Variablen herzustellen. Die relevanten Kausalzeitreihen sind in Tabelle 7-4 zusammengefasst.

Tabelle 7-4: Identifizierte Kausalzeitreihen

<i>ID</i>	<i>Indikator</i>
X_1	Unfälle mit Personenschaden [in N]
X_2	Unfälle mit Getöteten [in N]
X_3	Verunglückte [in N]
X_4	Schwerverletzte [in N]
X_5	schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden [in N]
X_6	Bestand an Personenkraftwagen [in N]
X_7	Gesamtlänge der deutschen Autobahnen [in Kilometern]
X_8	Fahrleistung von Personenkraftwagen [in Milliarden Kilometern]
X_9	Bruttoinlandsprodukt (BIP) je Einwohner [in €]
X_{10}	Bruttonationaleinkommen (BNE) pro Kopf [in €]

Die detaillierten Ergebnisse der Bestimmung der Signifikanzniveaus sind im Anhang H zusammengefasst. Anhand der Ergebnisse werden die potentiellen Kausalzeitreihen X_6 (Neuzulassungen von Personenkraftwagen), X_7 (Fahrzeugführer), X_8 (Pkw-Fahrer), X_9 (Bevölkerung in Deutschland), X_{10} (Leistungen der Kfz-Versicherungen) und X_{11} (Leichtverletzte) als nicht signifikant bewertet und nicht als Kausalzeitreihe identifiziert.

Die relevanten Kausalzeitreihen lassen sich ihrerseits in drei Gruppen unterteilen:

1. Die erste Gruppe X_1 bis X_5 beschreibt das *aggregierte Unfallaufkommen* auf deutschen Straßen. Hier kann ein hochkorrelativer Zusammenhang zu dem Verlauf des Unfallaufkommens in den relevanten Wirkfeldern identifiziert werden.
2. Die zweite Gruppe der Kausalzeitreihen X_6 bis X_8 beschreibt stärker die *physische Ausprägung* des Verkehrssystems (Bestand an Pkws; Länge der Autobahnen) sowie *Leistungsindikatoren* des Verkehrssystems (jährliche Fahrleistung)
3. Die dritte Gruppe X_9 und X_{10} beschreibt *monetäre Aspekte* der Gesellschaft (hier das Bruttoinlandsprodukt).

Keine der ausgewählten Kausalzeitreihen überdeckt sich inhaltlich direkt mit den in Abschnitt 7.3.1 definierten Zielvariablen. Dies ist insofern modelltheoretisch relevant, als dass das Prognosemodell nicht Zielvariablen prognostizieren soll, welche bereits als Prädiktorvariablen an das Modell durch das GM(1,1) prädiziert werden. Dementsprechend können zehn Kausalzeitreihen bestimmt werden, die an das Multilayer Perceptron Netz gegeben werden.

7.4 Darstellung der Prognoseergebnisse

Dieser Abschnitt zeigt die Prognoseergebnisse der Wirkfelder Y_1 bis Y_{16} . Die hier vorgenommene Betrachtung der Ergebnisse erfolgt rein deskriptiv: Es werden die Kennzahlen der Trends sowie deren Plausibilität im Vergleich zur Originalzeitreihe des Wirkfelds dargelegt. Es wird weiterhin die Korrelation der jeweiligen Sicherheitspotentialkurven der Maßnahmen auf den Verlauf der Prognose angewendet. Hierdurch ist einerseits erkennbar, inwieweit eine Maßnahme bereits auf das Wirkfeld einen Effekt ausgeübt hat; andererseits kann das mögliche verbleibende Sicherheitspotential der Maßnahme im Wirkfeld erkannt werden. Ab einem Korrelationswert von 0,3 wird der Zusammenhang als klein angesehen, ab ca. 0,5 als gut und ab ca. 0,7–0,8 als (sehr) gute Korrelation.¹³ Die bewertende Interpretation der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 7.5 zur Bestimmung der Implikationen für Entscheidungsträger.

7.4.1 Infrastrukturspezifisches Unfallaufkommen

7.4.1.1 Getötete außerhalb von Ortschaften

In der prognostizierten Zielvariablen Y_1 wird die Entwicklung der Getöteten außerhalb von Ortschaften betrachtet, dieses Wirkfeld enthält den größten Anteil an Verkehrstoten im Verkehrssystem. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_1 zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. In der Unfalldatenbank ist die Zielvariable Y_1 ab 1991 verfügbar. Folgende Sicherheitspotentiale sind im betreffenden Wirkfeld verortet:

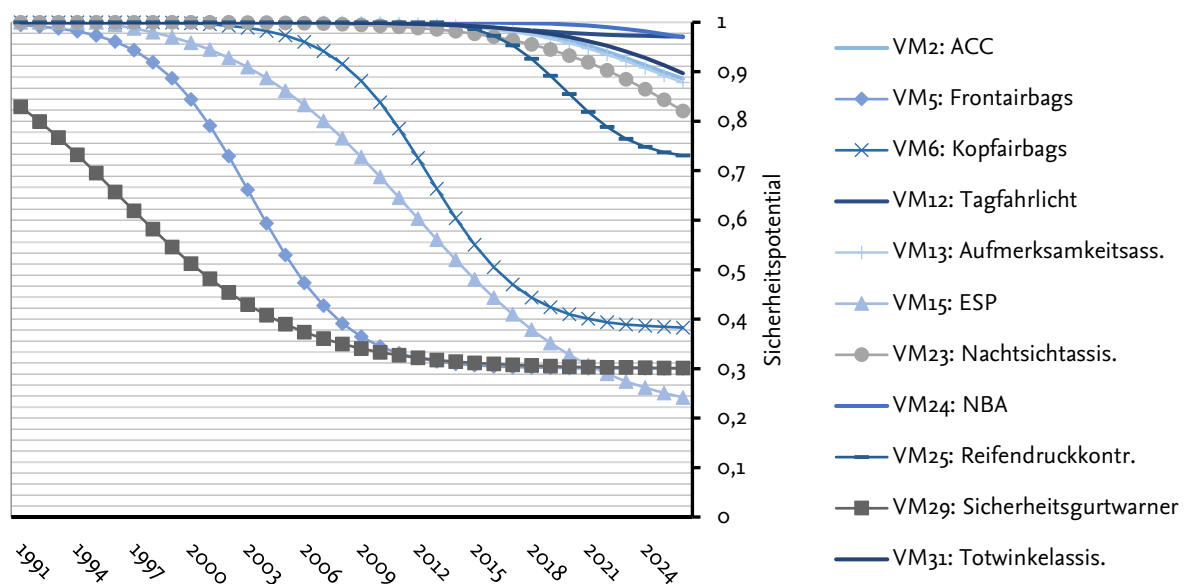


Abbildung 7-2: Sicherheitspotentiale außerhalb von Ortschaften

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann die in Abbildung 7-3 dargestellte Prognose ermittelt werden: Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken des Systemverhaltens wird wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend; von vormals 2411 Getöteten in 2016

¹³ Die Grenzen der Korrelationswerte orientieren sich an den üblichen Grenzen psychologischer Fragebögen, vgl. [Vollrath 2012].

kann die Opferanzahl auf ca. 1200 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 50%.

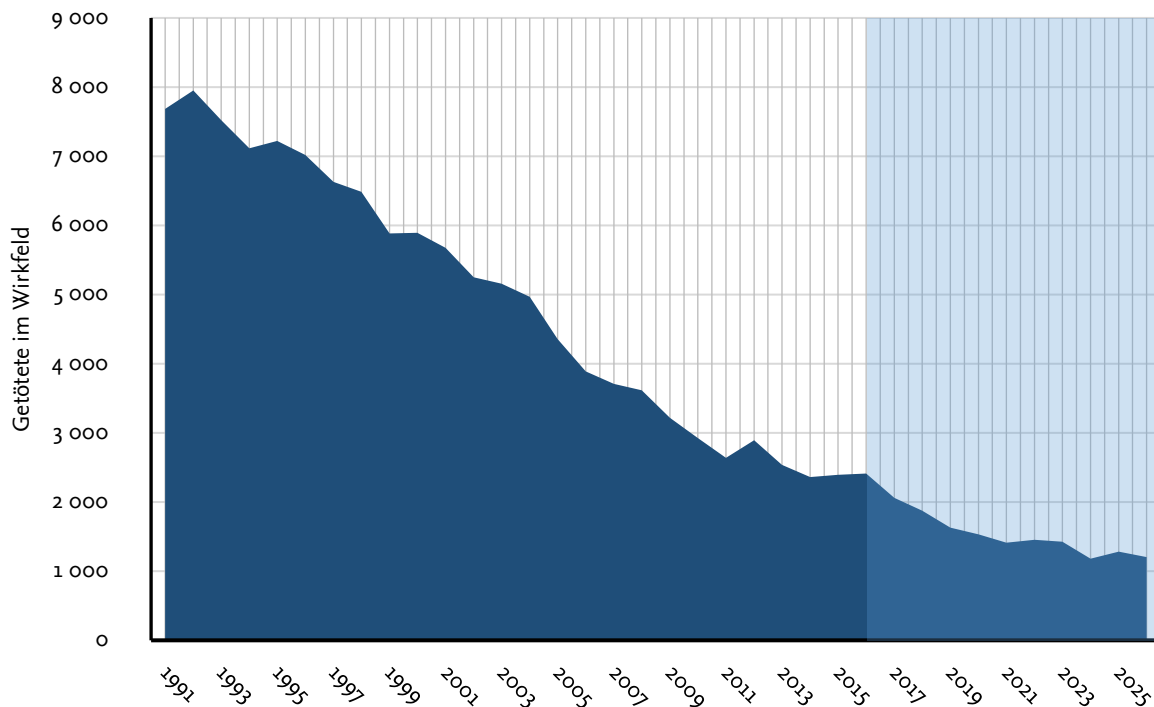


Abbildung 7-3: Prognose der Getöteten außerhalb von Ortschaften

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM24 (Notbremsassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) sind gut korreliert ($0,5 < r < 0,7$). Den schwächsten Korrelationswert weist VM25 mit $r=0,56$ auf. Sehr gute Korrelationen lassen sich für die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM12 (Tagfahrlicht), VM15 (ESP), VM23 (Nachtsichtassistent) und VM29 (Gutwarnsystem) bestimmen, vgl. folgende Zusammenfassung:

Table 7-1: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld außerhalb von Ortschaften

	VM2	VM5	VM6	VM12	VM13	VM15	VM23	VM24	VM25	VM29	VM31
Y_2	0,66	0,96	0,91	0,8	0,68	0,96	0,72	0,56	0,67	0,94	0,67

7.4.1.2 Getötete innerhalb von Ortschaften

In der prognostizierten Zielvariablen Y_2 wird die Entwicklung der Getöteten innerhalb von Ortschaften prognostiziert. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_2 zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. In der Unfalldatenbank ist die Zielvariable Y_2 ab 1991 verfügbar. Folgende Sicherheitspotentiale sind im betreffenden Wirkfeld verortet:

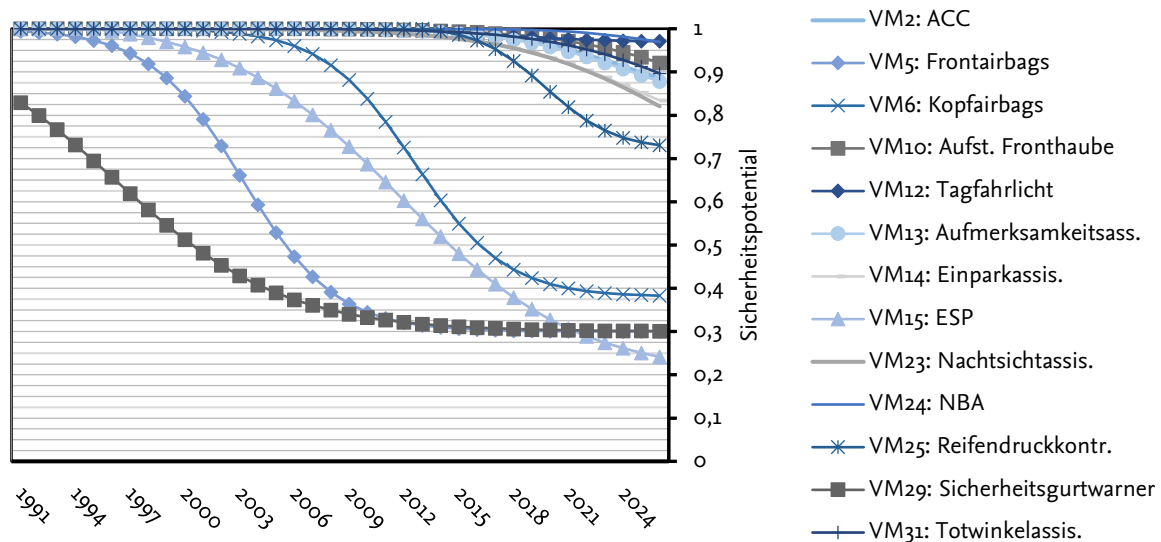


Abbildung 7-4: Sicherheitspotentiale innerhalb von Ortschaften

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann die in Abbildung 7-5 dargestellte Prognose ermittelt werden. Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend; von vormals 1048 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 395 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 60%. Das Modell prognostiziert eine sprunghafte Verbesserung der Verkehrssicherheit in dem Jahresübergang von 2016 auf 2017.

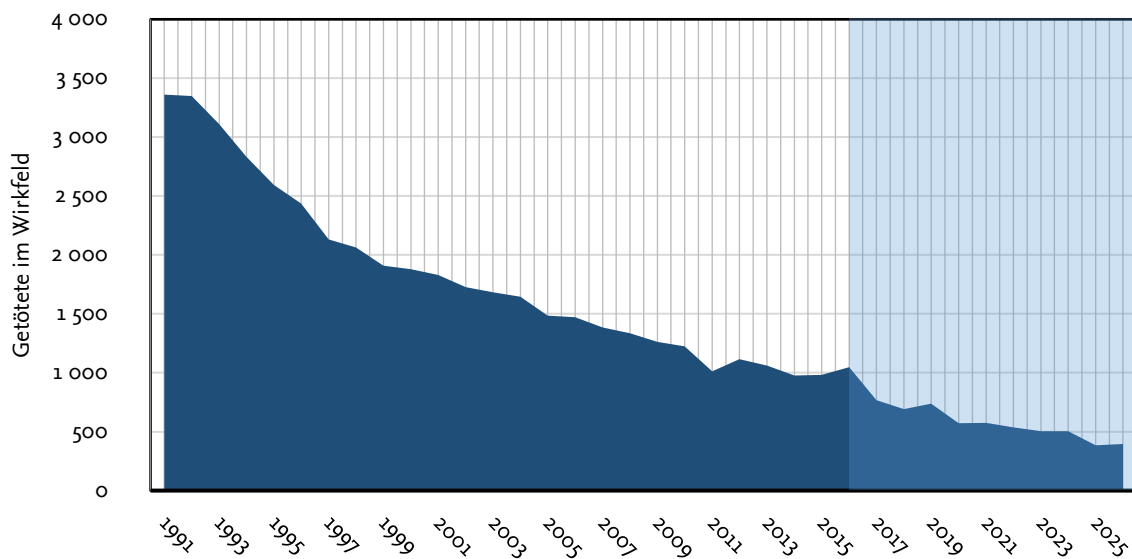


Abbildung 7-5: Prognose der Getöteten innerhalb von Ortschaften

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die VM24 (Notbremsassistent) zeigt als einzige Maßnahme eine gute Korrelation von $r < 0,7$. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM10 (aufstellbare Fronthaube), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM14 (Einparkassistent), VM23 (Nachtsichtassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) zeigen Korrelationswerte von $r < 0,9$. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM15 (ESP) und VM29 (Gurtwarnsystem) weisen ein $r > 0,9$ auf, vgl. folgende Zusammenfassung:

Table 7-2: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld innerhalb von Ortschaften

	VM2	VM5	VM6	VM10	VM12	VM13	VM14	VM15	VM23	VM24	VM25	VM29	VM31
Y_2	0,73	0,92	0,92	0,74	0,85	0,75	0,8	0,97	0,79	0,63	0,74	0,91	0,74

7.4.1.3 Getötete auf Autobahnen

In der prognostizierten Zielvariablen Y_3 werden die Getöteten auf Autobahnen betrachtet. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_3 zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. In der Unfalldatenbank ist die Zielvariable Y_3 ab 1991 verfügbar. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

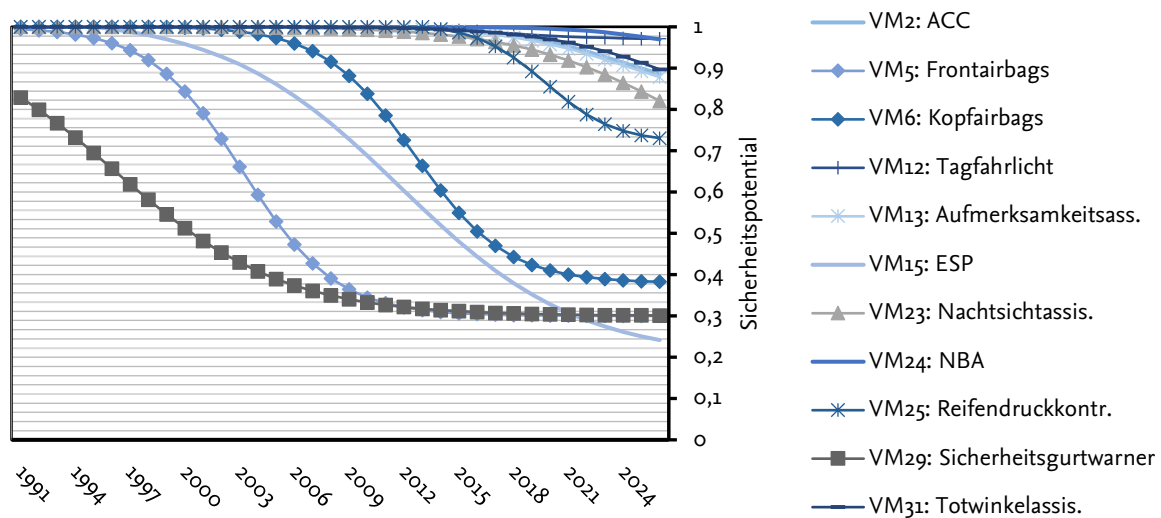


Abbildung 7-6: Sicherheitspotentiale auf Autobahnen

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann die in Abbildung 7-7 dargestellte Prognose für die Zielvariable Y_3 ermittelt werden. Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend; von vormals 414 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 240 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 40%.

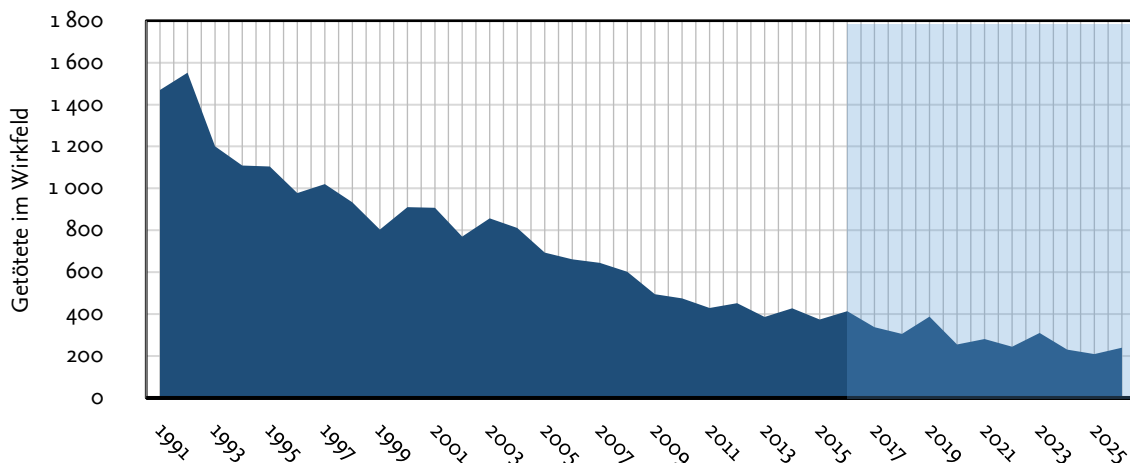


Abbildung 7-7: Prognose der Getöteten auf Autobahnen

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM24 (Notbremsassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) zeigen Korrelationswerte von $0,5 < r < 0,7$. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM12 (Tagfahrlicht), VM15 (ESP), VM23 (Nachtsichtassistent) und VM29 (Gurtwarnsystem) zeigen Korrelationswerte von $r > 0,7$, vgl. folgende Zusammenfassung:

Tabelle 7-5: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Autobahn

	VM2	VM5	VM6	VM12	VM13	VM15	VM23	VM24	VM25	VM29	VM31
Y_3	0,67	0,93	0,91	0,8	0,69	0,96	0,73	0,57	0,67	0,91	0,68

7.4.1.4 Getötete im Baustellenbereich

Die Zielvariable Y_4 stellt das Aufkommen von Getöteten im Baustellenbereich dar. In der verfügbaren Unfalldatenbank sind die Originalzeitreihen ab 1996 verfügbar, daher wird hier eine Anpassung der Input-Daten vorgenommen und die Input-Zeitreihen an die verfügbare Datenbasis angepasst. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_4 zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

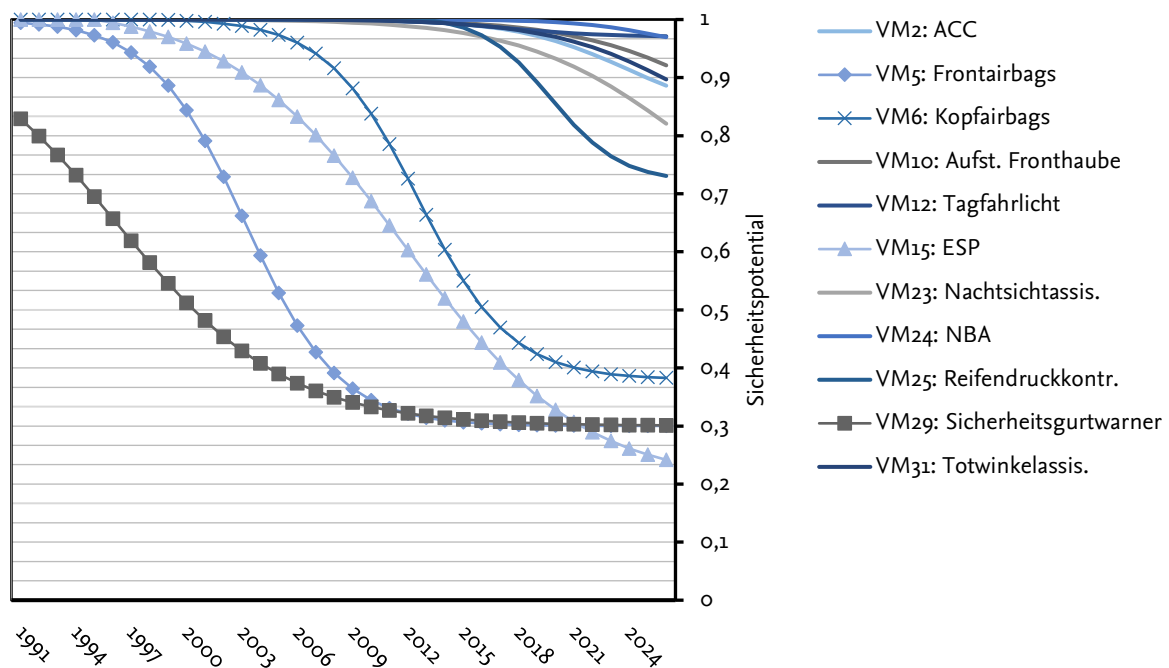


Abbildung 7-8: Sicherheitspotentiale im Baustellenbereich

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann folgende Prognose ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-9): Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist stagnierend; von vormals 414 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 385 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 7%.

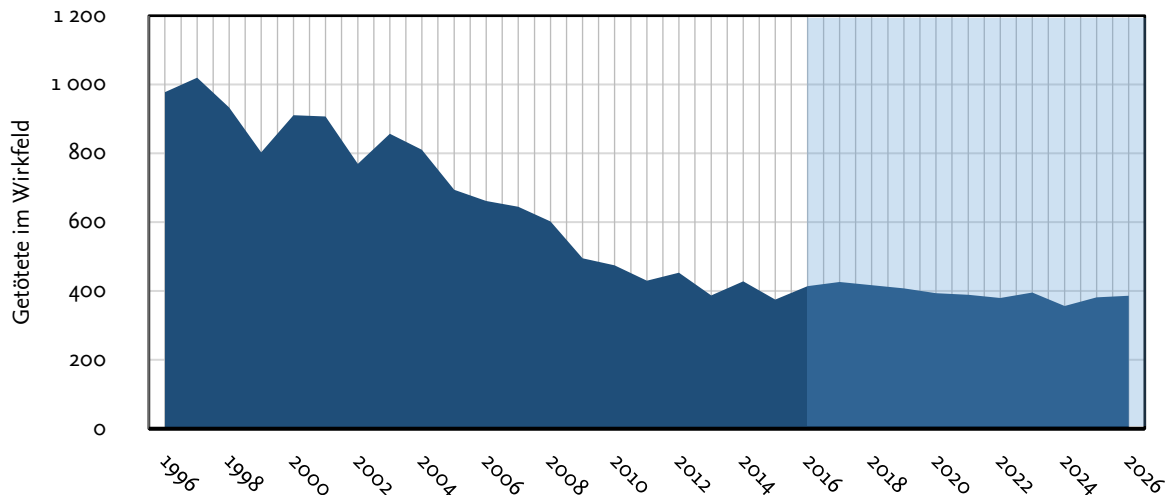


Abbildung 7-9: Prognose der Getöteten im Baustellenbereich

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahme VM24 (Notbremsassistent) liegt als einzige unter $r < 0,7$. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM10 (Aufstellbare Fronthaube), VM12 (Tagfahrlicht), VM23 (Nachtsichtassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) liegen zwischen $0,7 < r < 0,9$. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM15 (ESP) und VM29 (Gurtwarnsystem) weisen Korrelationswerte $> 0,9$ auf, vgl. folgende Zusammenfassung:

Tabelle 7-6: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Baustellenbereich

	VM2	VM5	VM6	VM10	VM12	VM15	VM23	VM24	VM25	VM29	VM31
Y_5	0,72	0,92	0,92	0,73	0,85	0,97	0,78	0,62	0,73	0,92	0,73

7.4.1.5 Getötete auf Bundesstraßen

Das folgende infrastrukturspezifische Wirkfeld stellt die Entwicklung der Getöteten auf Bundesstraßen dar, hier die Zielvariable Y_5 . Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_5 zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. In der Unfalldatenbank ist die Zielvariable Y_5 ab 1991 verfügbar. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

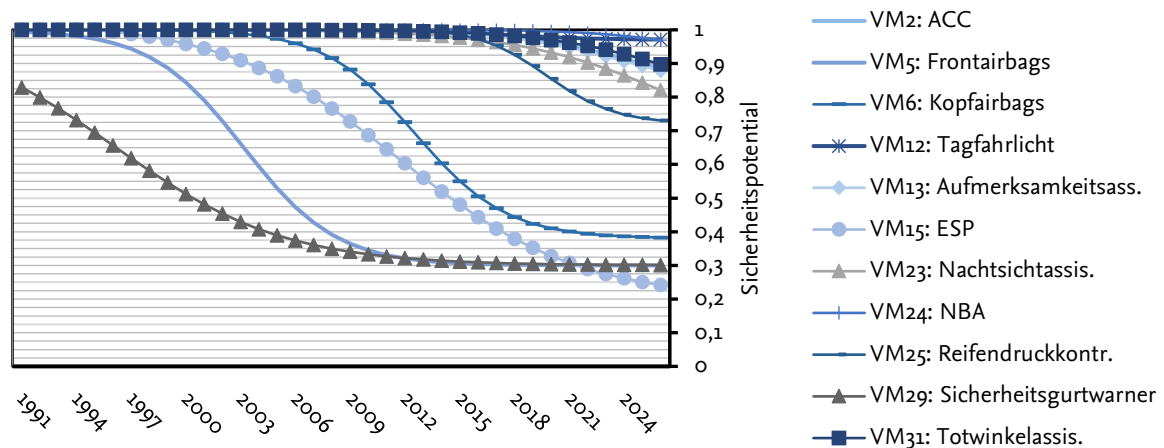


Abbildung 7-10: Sicherheitspotentiale auf Bundesstraßen

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann folgende Prognose ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-11): Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Das Prognosemodell erwartet einen deutlichen Sprung in den Getöteten-zahlen von 2016 auf 2017. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend; von vormals 1048 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 440 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von knapp 60%.

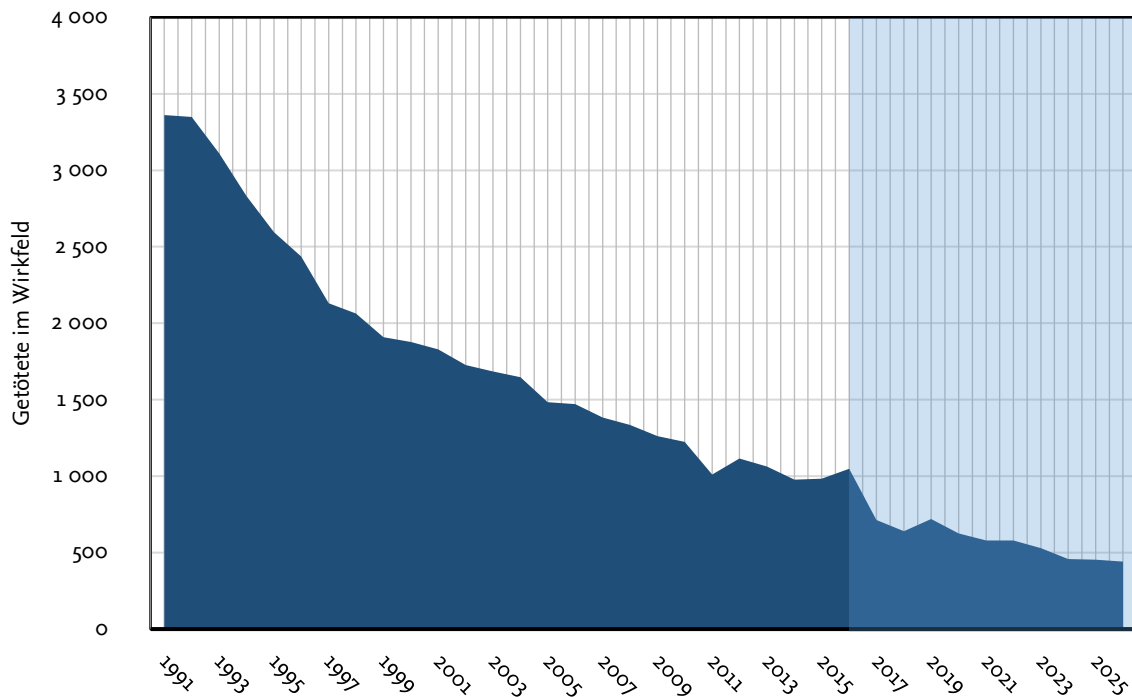


Abbildung 7-11: Prognose der Getöteten auf Bundesstraßen

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahme VM24 (Notbremsassistent) liegt als einzige unter $r < 0,7$. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM12 (Tagfahrlicht), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM23 (Nachtsichtassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) liegen zwischen $0,7 < r < 0,9$. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM15 (ESP) und VM29 (Gurtwarnsystem) weisen Korrelationswerte $>0,9$ auf, vgl. folgende Zusammenfassung:

Tabelle 7-7: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Bundesstraßen

	VM2	VM5	VM6	VM12	VM13	VM15	VM23	VM24	VM25	VM29	VM31
Y5	0,72	0,92	0,92	0,85	0,74	0,97	0,78	0,62	0,73	0,92	0,73

7.4.1.6 Getötete auf Kreisstraßen

Die Zielvariable Y_6 beschreibt die Entwicklung der Getöteten auf Kreisstraßen. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_6 zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben: In der Unfalldatenbank ist die Zielvariable Y_6 ab 1992 verfügbar. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

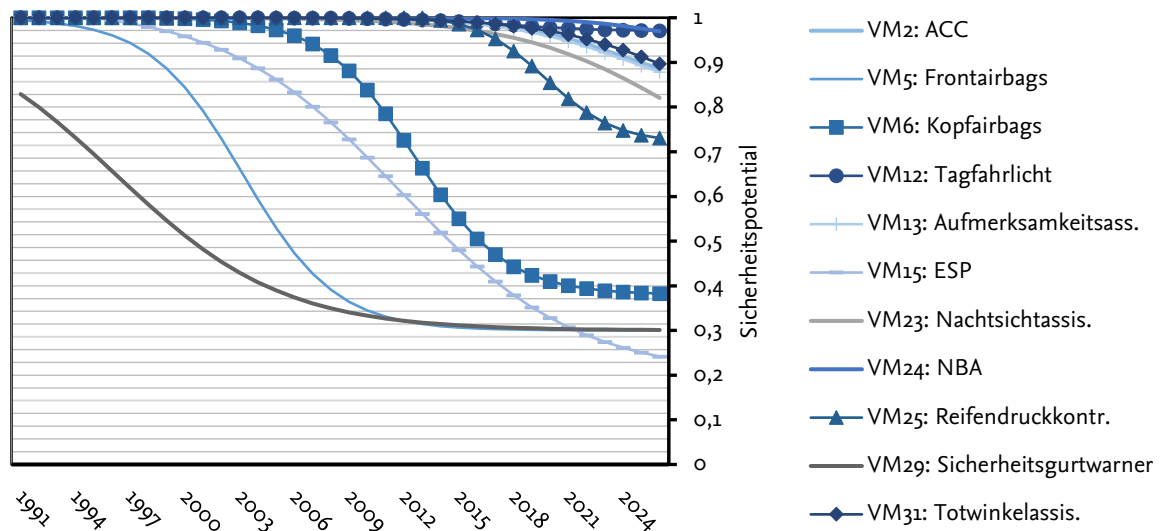


Abbildung 7-12: Sicherheitspotentiale auf Kreisstraßen

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann folgende Prognose ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-13): Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Das Prognosemodell erwartet einen fallenden Trend bis ca. 2020 und danach eine Stagnation der Entwicklung der Getöteten. Der Trend von 2016 bis 2026 ist insgesamt fallend; von vormals 471 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 260 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von knapp 45%.

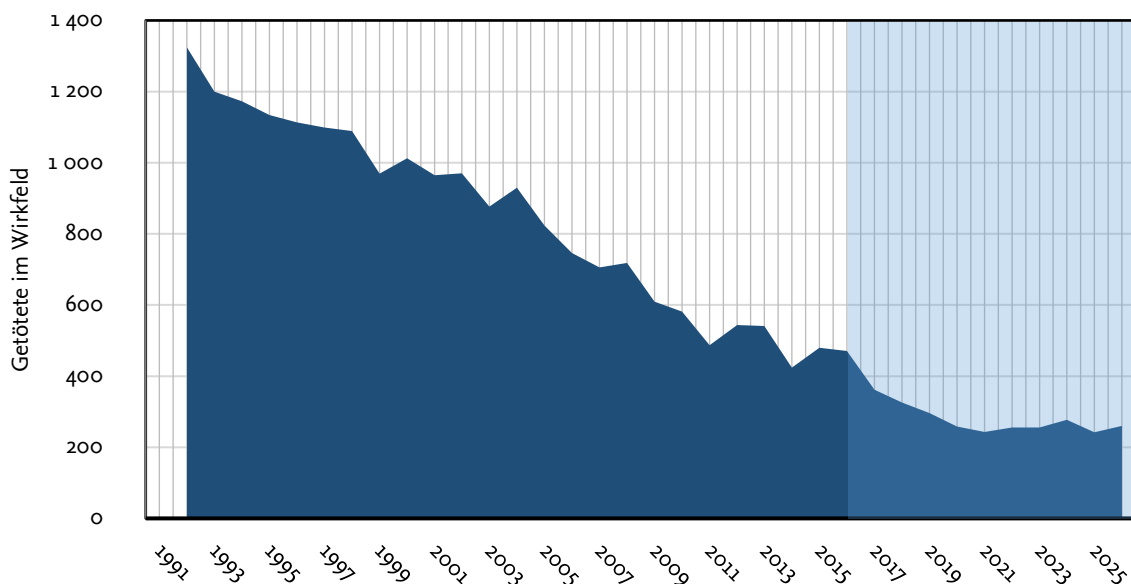


Abbildung 7-13: Prognose der Getöteten auf Kreisstraßen

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahme VM24 (Notbremsassistent) liegt als einzige unter $r < 0,7$. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM12 (Tagfahrlicht), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM23 (Nachtsichtassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) liegen zwischen $0,7 < r < 0,9$. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM15 (ESP) und VM29 (Gurtwarnsystem) weisen Korrelationswerte $> 0,9$ auf, vgl. folgende Zusammenfassung

Tabelle 7-8: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Kreisstraßen

	VM2	VM5	VM6	VM12	VM13	VM15	VM23	VM24	VM25	VM29	VM31
Y6	0,70	0,92	0,94	0,85	0,72	0,98	0,76	0,59	0,72	0,9	0,7

7.4.2 Unfallaufkommen an Verkehrsmodenübergängen

7.4.2.1 Getötete an Fußgängerüberwegen

Das hier dargestellte Wirkfeld beinhaltet das Unfallaufkommen von Verkehrstoten an Fußgängerüberwegen. Nominell ist die jährliche Zahl an tödlich Verunglückten relativ gering ($<50/a$). Da innerhalb der verwendeten Unfalldatenbank diese Zielvariable erst ab 1996 erhoben wurde, werden die Input-Variablen angepasst. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_7 zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

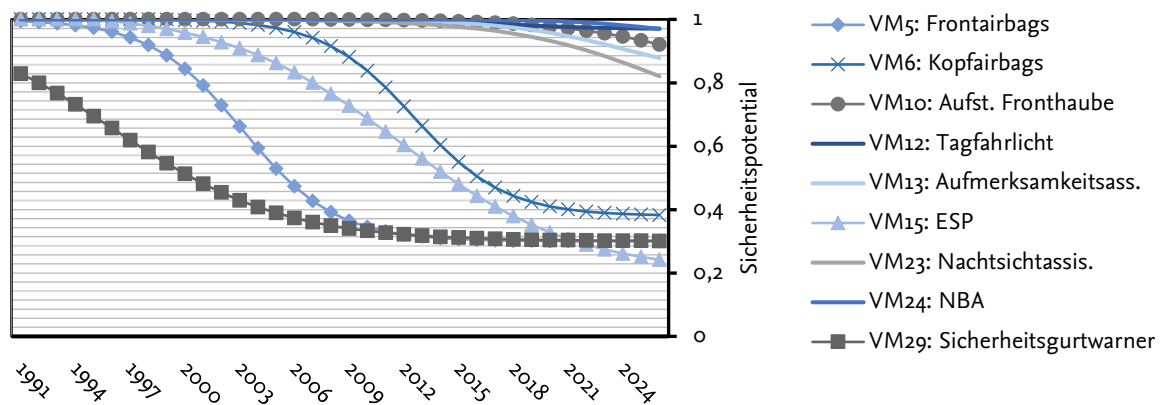


Abbildung 7-14: Sicherheitspotentiale an Fußgängerüberwegen

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann folgende Prognose ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-15): Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht nicht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird nicht wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend; von vormals 20 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 10 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 50%.

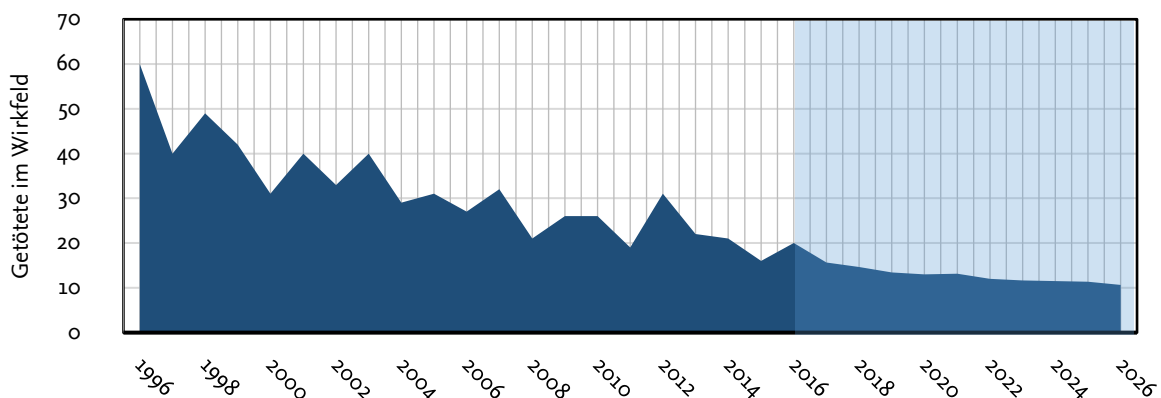


Abbildung 7-15: Prognose der Getöteten an Fußgängerüberwegen

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahmen VM10 (aufstellbare Fronthaube), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM23 (Nachtsichtassistent), und VM24 (Notbremsassistent) zeigen gute Korrelationswerte. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM12 (Tagfahrlicht), VM15 (ESP) und VM29 (Gurtwarnsystem) zeigen sehr gute Korrelationen, vgl. folgende Zusammenfassung:

Tabelle 7-9: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Fußgängerüberwege

	VM5	VM6	VM10	VM12	VM13	VM15	VM23	VM24	VM29
Y7	0,89	0,85	0,64	0,77	0,65	0,89	0,69	0,54	0,9

7.4.2.2 Getötete an Bahnübergängen

Die Zielvariable Y_8 beinhaltet das Unfallaufkommen von Getöteten an Bahnübergängen. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_8 zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Zielvariable ist ab 1996 in der Unfalldatenbank enthalten. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

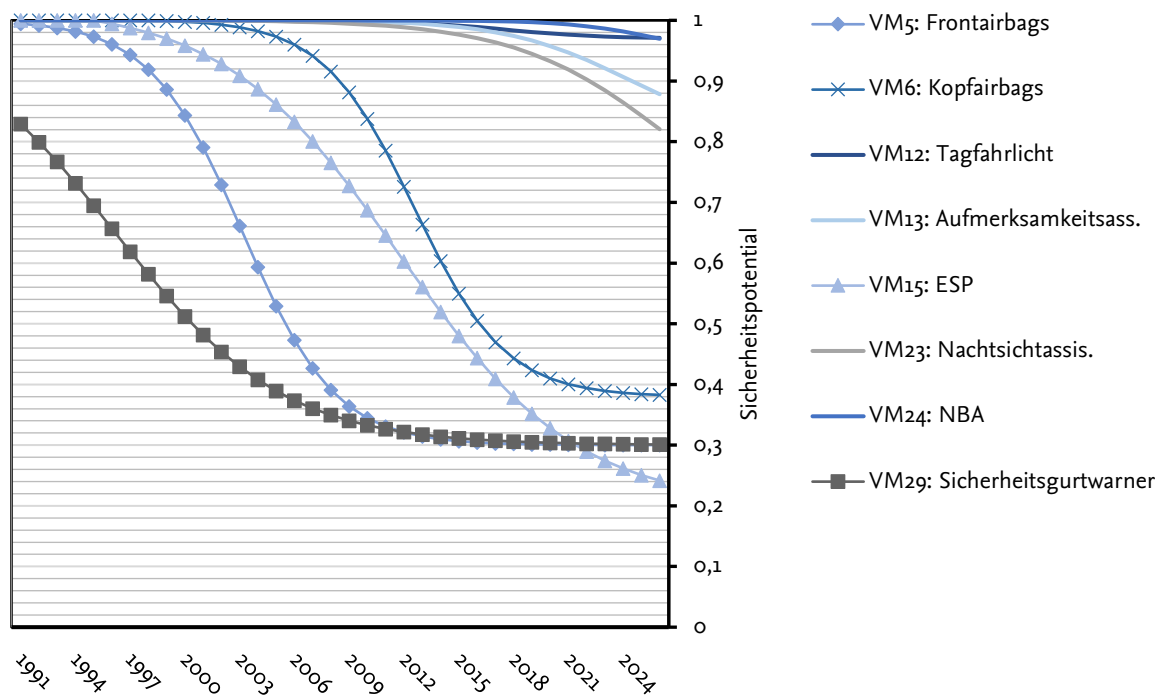


Abbildung 7-16: Sicherheitspotentiale an Bahnübergängen

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann folgende Prognose ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-17): Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend; von vormals 43 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 10 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 76%.

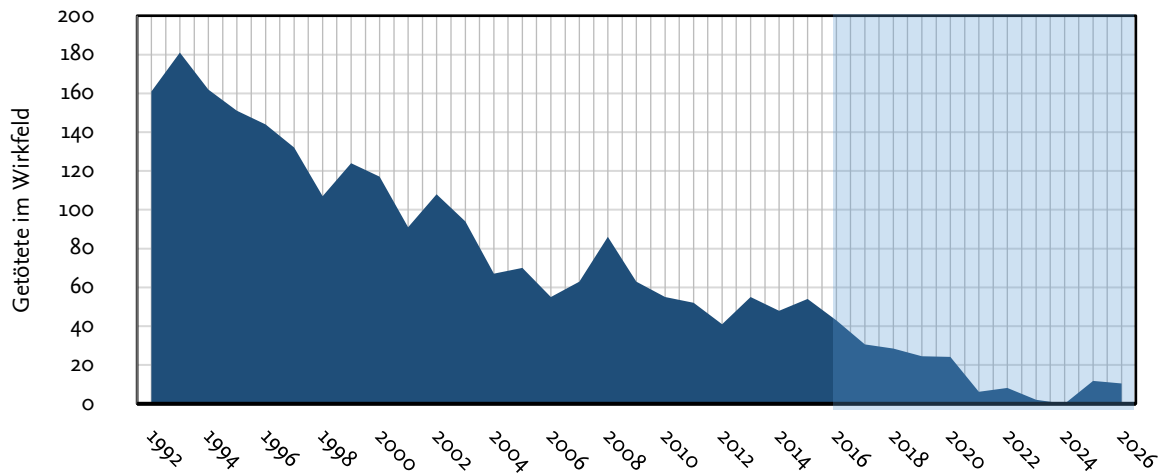


Abbildung 7-17: Prognose des Unfallaufkommens an Bahnübergängen

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Nur die Maßnahme VM24 (Notbremsassistent) zeigt im Vergleich zu den übrigen Maßnahmen im Wirkfeld eine weniger gute Korrelation. Die weiteren Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM15 (ESP), VM23 (Nachtsichtassistent) und VM29 (Gurtwarnsystem) zeigen sehr gute Korrelationswerte, vgl. folgende Zusammenfassung:

Tabelle 7-10: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Bahnübergänge

	VM5	VM6	VM13	VM15	VM23	VM24	VM29
Y8	0,9	0,88	0,73	0,93	0,77	0,62	0,91

7.4.3 Witterungsverhältnisspezifisches Unfallaufkommen

7.4.3.1 Getötete bei Tageslicht

Die Zielvariable Z_9 beschreibt das Aufkommen von Getöteten bei Tageslichtverhältnissen. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_9 zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Zielvariable ist ab 1992 in der Unfalldatenbank enthalten. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

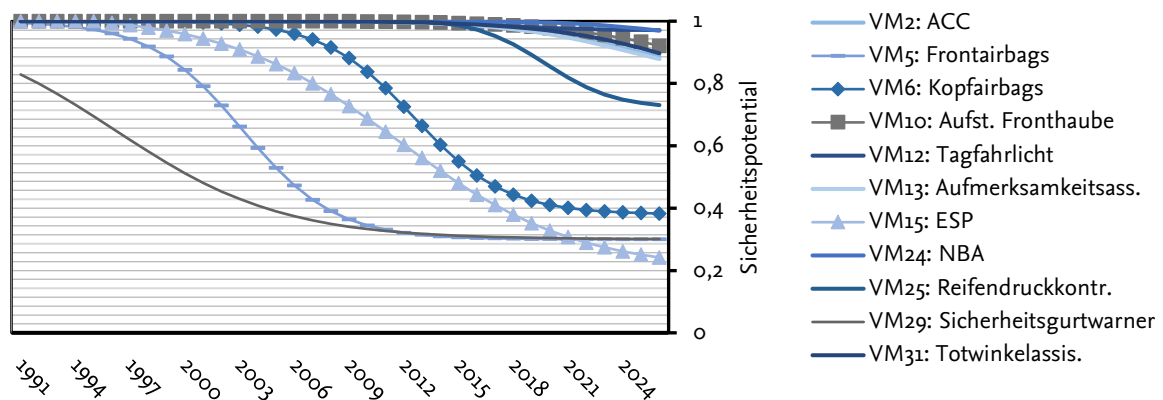


Abbildung 7-18: Sicherheitspotentiale bei Tageslichtverhältnissen

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann folgende Prognose ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-19): Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend; von vormals 2278 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 1680 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 26%.

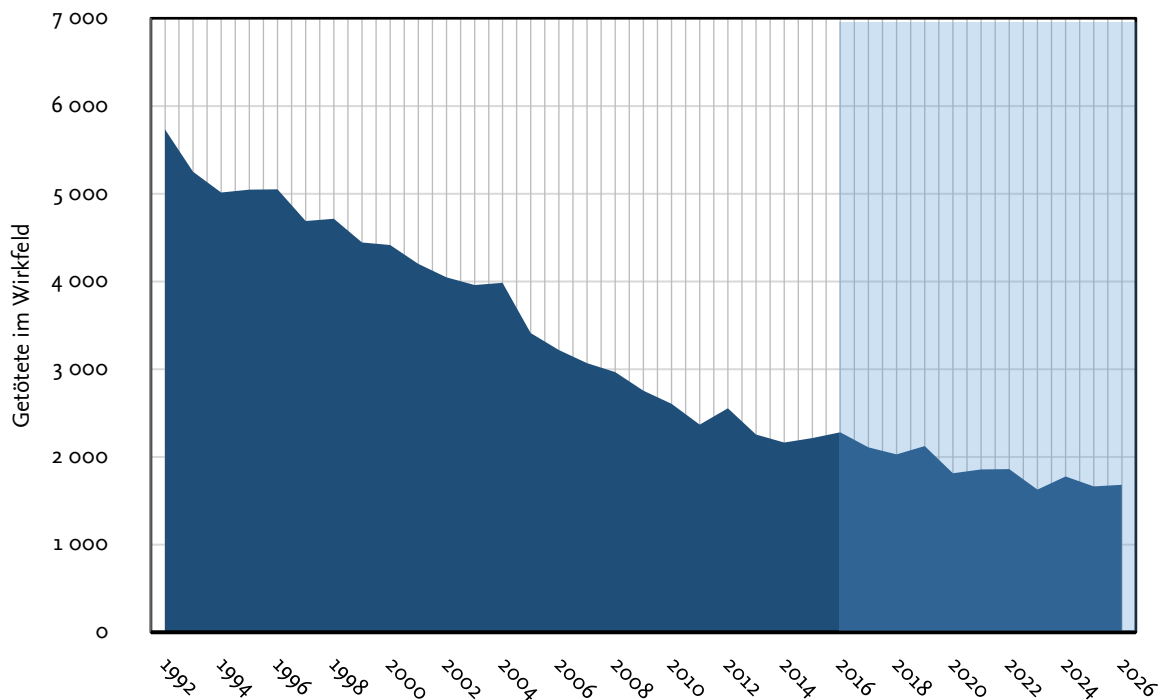


Abbildung 7-19: Prognose der Getöteten bei Tageslichtverhältnissen

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM10 (aufstellbare Fronthaube), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM24 (Notbremsassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) zeigen gute Korrelationen. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM12 (Tagfahrlicht), VM15 (ESP) und VM29 (Gurtwarnsystem) zeigen sehr gute Korrelationen, vgl. folgende Zusammenfassung:

Tabelle 7-11: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Tageslichtverhältnisse

	VM2	VM5	VM6	VM10	VM12	VM13	VM15	VM24	VM25	VM29	VM31
Y9	0,64	0,97	0,89	0,64	0,77	0,65	0,95	0,54	0,64	0,94	0,64

7.4.3.2 Getötete bei Dämmerung

Die Zielvariable Y_{10} betrachtet die Zeitreihe der Getöteten bei Dämmerungsverhältnissen. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_{10} zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Zielvariable ist ab 1992 in der Unfalldatenbank enthalten. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

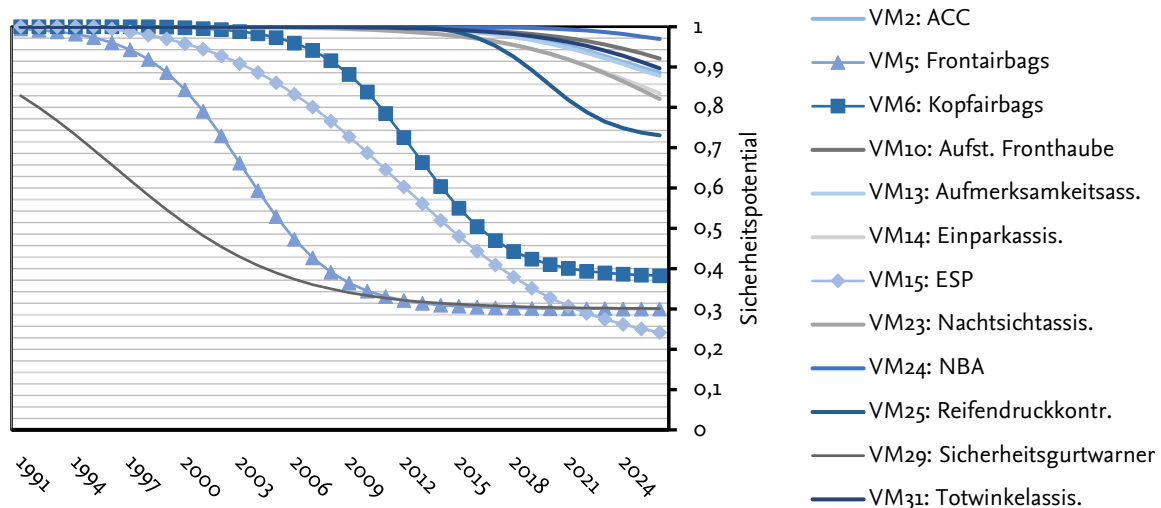


Abbildung 7-20: Sicherheitspotentiale bei Dämmerungsverhältnissen

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann die in der Abbildung 7-21 dargestellte Prognose ermittelt werden: Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Im Jahresübergang 2020 auf 2021 stellt das Netz die Erwartung auf, dass es zu einem erneuten Anstieg der Getöteten bei Dämmerungsverhältnissen kommt. Es wird hier vermutet, dass aufgrund der in der Zielvariablen erkennbaren sprunghaften Anstiege (siehe 1999 auf 2000) das neuronale Netz hier einen erneuten kausalen Zusammenhang in der Prognose erkennt. Der Trend von 2016 bis 2026 ist insgesamt fallend; von vormals 166 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 54 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 67%.

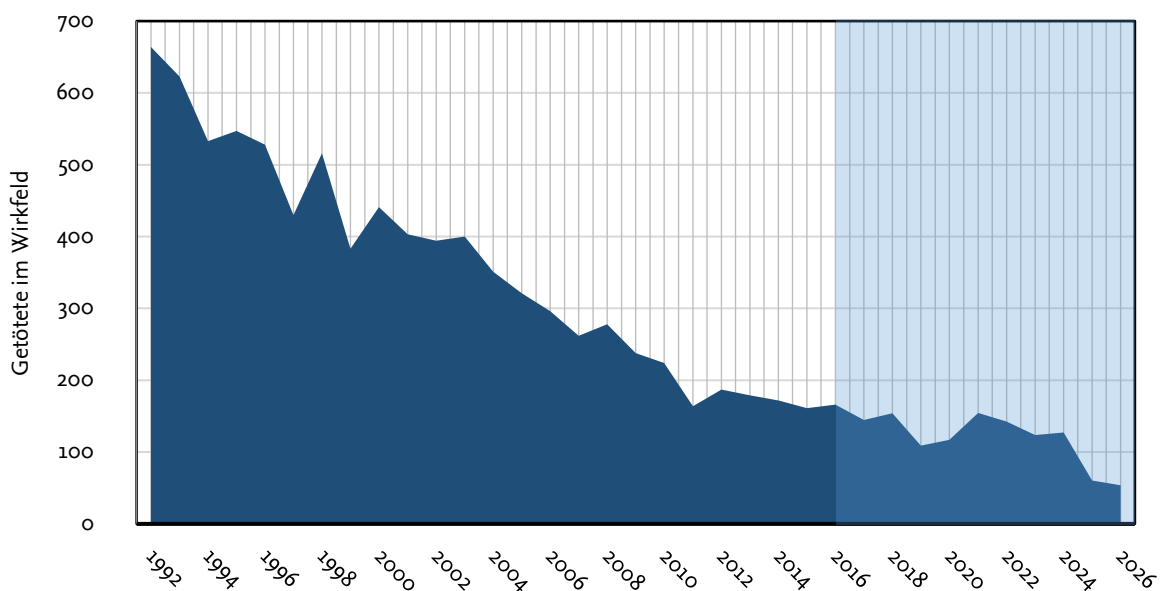


Abbildung 7-21: Prognose der Getöteten bei Dämmerungsverhältnissen

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM10 (aufstellbare Fronthaube), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM14 (Einparkassistent), VM15 (Nachtsichtassistent), VM24 (Notbremsassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) zeigen gute Korrelationswerte. Die

Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6(Kopfairbags), VM15 (ESP) und VM29 (Gurtwarnsystem) zeigen sehr gute Korrelationen, vgl. folgende Zusammenfassung:

Tabelle 7-12: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Dämmerungsverhältnisse

	VM2	VM5	VM6	VM10	VM13	VM14	VM15	VM23	VM24	VM25	VM29	VM31
Y10	0,62	0,95	0,88	0,63	0,64	0,69	0,93	0,68	0,53	0,62	0,93	0,63

7.4.3.3 Getötete bei Dunkelheit

Die Zielvariable Y_{11} beinhaltet die Unfälle mit tödlichen Verletzten bei Dunkelheit. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_{11} zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Zielvariable ist ab 1992 in der Unfalldatenbank enthalten. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

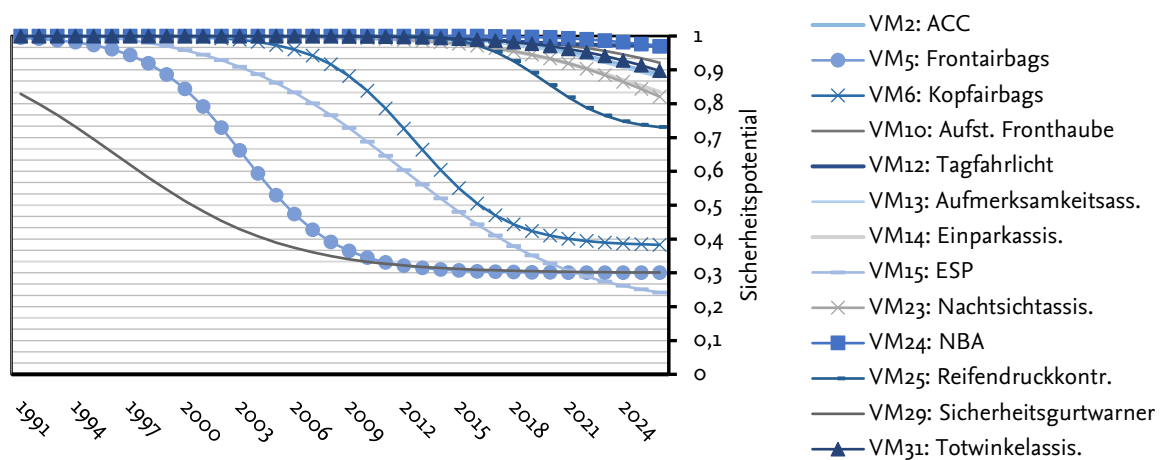


Abbildung 7-22: Sicherheitspotentiale bei Dunkelheit

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann folgende Prognose ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-23): Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend, wobei zeitnah vom Prognosemodell ein erneuter Anstieg der Getöteten bei Dunkelheit prognostiziert wird. Von vormals 1015 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 415 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 60%.

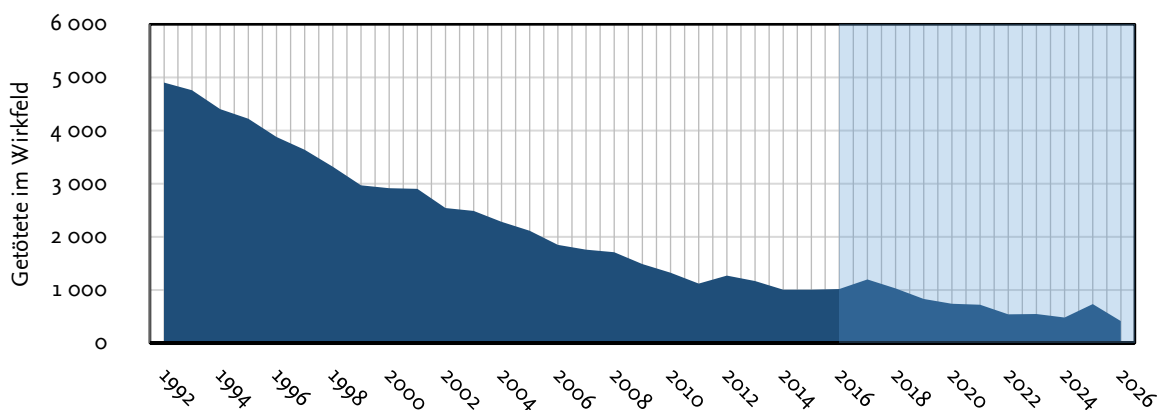


Abbildung 7-23: Prognose der Getöteten bei Dunkelheit

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM10 (aufstellbare Fronthaube), VM24 (Notbremsassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) zeigen gute Korrelationswerte. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM12 (Tagfahrlicht), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM14 (Einparkassistent), VM15 (ESP), VM23 (Nachtsichtassistent) und VM29 (Gurtwarnsystem) sind hochkorreliert.

Tabelle 7-13: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Dunkelheit

	VM2	VM5	VM6	VM10	VM12	VM13	VM14	VM15	VM23	VM24	VM25	VM29	VM31
Y11	0,69	0,95	0,89	0,69	0,8	0,70	0,75	0,95	0,74	0,60	0,69	0,95	0,69

7.4.3.4 Getötete bei Nebel

Die Zielvariable Y_{12} ist die Anzahl der Getöteten bei Nebel enthalten. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_{12} zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Zielvariable ist ab 1992 in der Unfalldatenbank enthalten. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

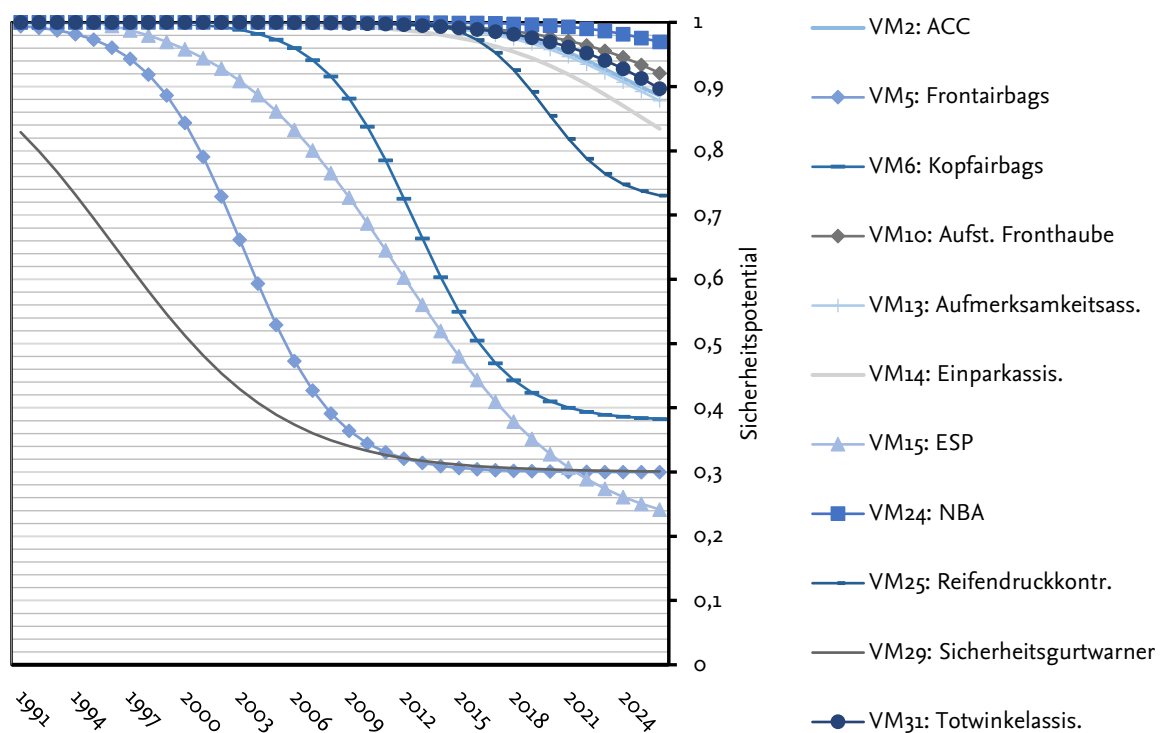


Abbildung 7-24: Sicherheitspotentiale bei Nebel

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann die in Abbildung 7-25 bereitgestellte Prognose ermittelt werden. Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist stagnierend. Von vormals 11 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 10 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 9%.

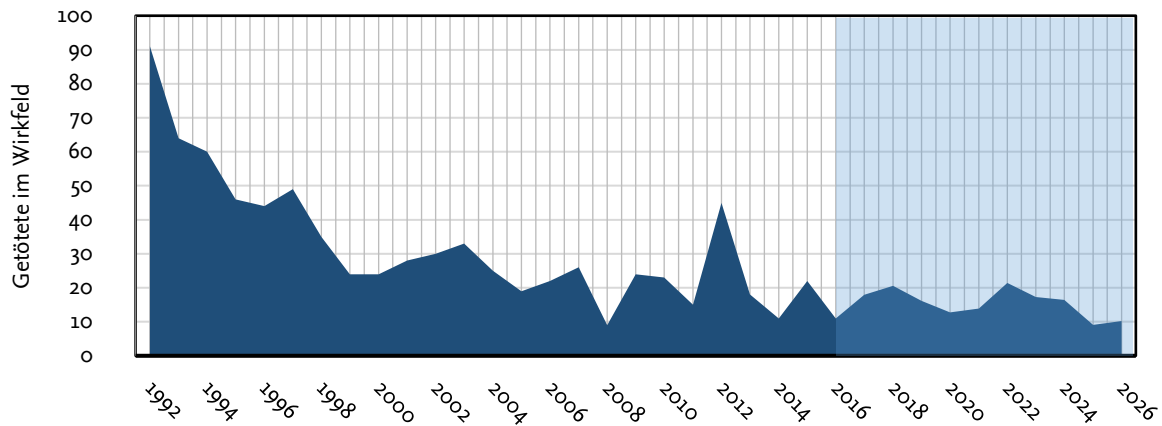


Abbildung 7-25: Prognose der Getöteten bei Nebel

Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM10 (aufstellbare Fronthaube), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM14 (Einparkassistent), VM24 (Notbremsassistent), VM25 (Reifendruckkontrollsystem) und VM31 (Totwinkelassistent) zeigen geringe Korrelationswerte mit $r < 0,5$. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags) und VM15 (ESP) weisen gute Korrelationen auf. Die Maßnahme VM29 (Gurtwarnsystem) ist hochkorreliert.

Tabelle 7-14: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkungsfeld Nebel

	VM2	VM5	VM6	VM10	VM13	VM14	VM15	VM24	VM25	VM29	VM31
Y12	0,44	0,68	0,58	0,44	0,45	0,48	0,63	0,38	0,43	0,72	0,44

7.4.4 Ursachenspezifisches Unfallaufkommen

7.4.4.1 Getötete durch Übermüdung

Die Zielvariable Y_{13} beinhaltet das Aufkommen der Getöteten durch nachweisliche Übermüdung. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_{13} zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Zielvariable ist ab 1992 in der Unfalldatenbank enthalten. Die Sicherheitspotentiale im Wirkungsfeld sind folgend dargestellt:

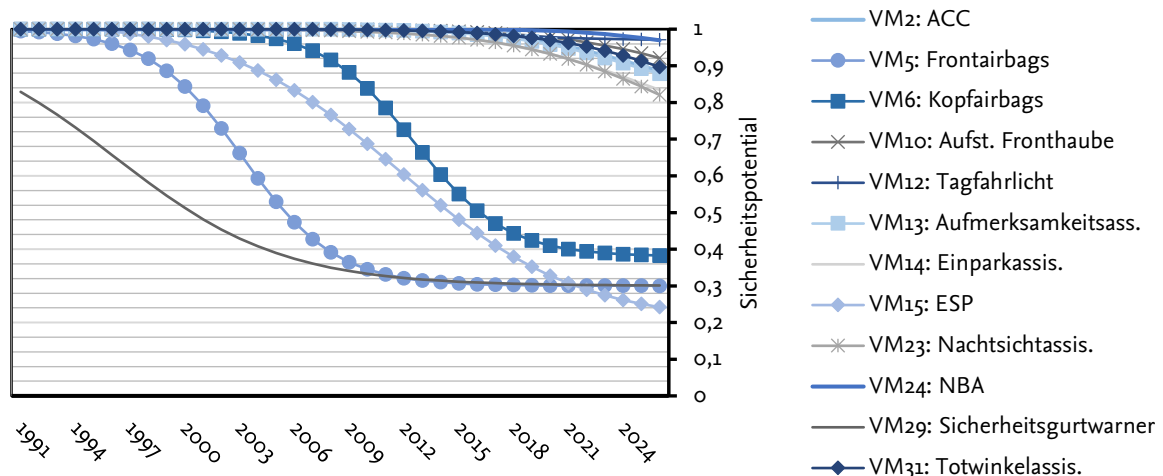


Abbildung 7-26: Sicherheitspotentiale bei Übermüdung

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann die in der Abbildung 7-27 dargestellte Prognose ermittelt werden. Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht nicht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird nicht wiedergegeben. Es können keine Implikationen aus der Prognose gezogen werden. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend. Von vormals 59 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 18 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 70%.

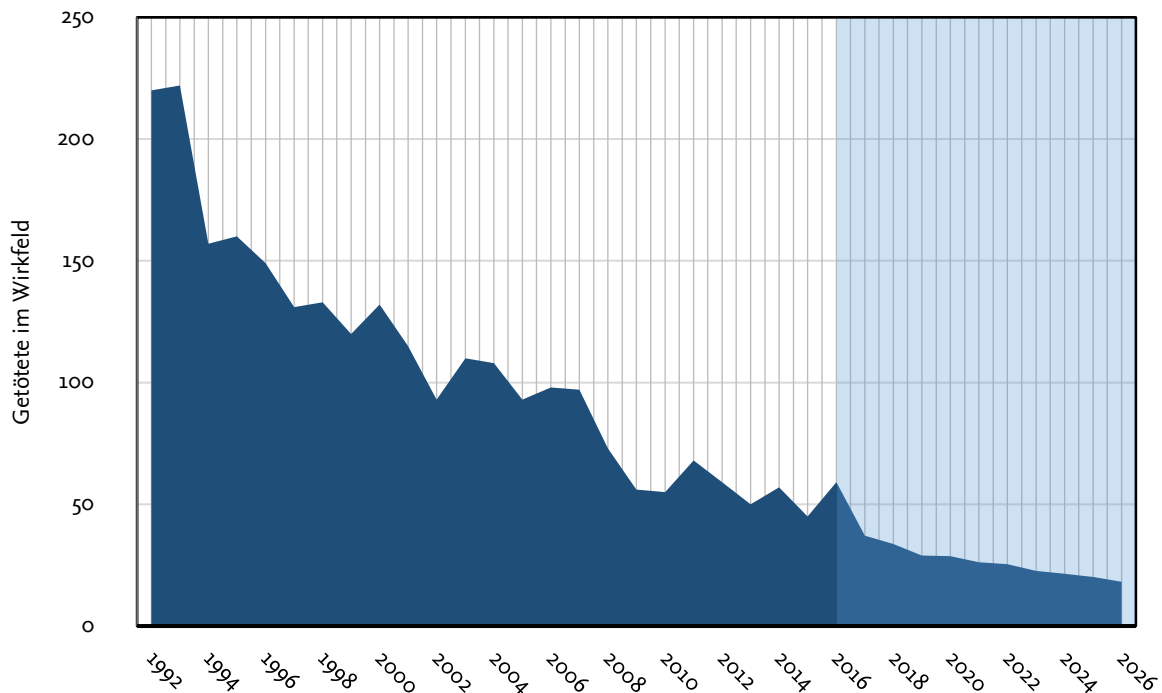


Abbildung 7-27: Prognose der Getöteten durch Übermüdung

Die Werte der im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen mindestens gute ($>0,5$) Korrelationen. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM10 (aufstellbare Fronthaube), VM24 (Notbremsassistent) und VM31 (Totwinkelassistent) weisen gute Korrelationswerte auf. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM12 (Tagfahrlicht), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM14 (Einparkassistent), VM15 (ESP), VM23 (Nachtsichtassistent) und VM29 (Gurtwarnsystem) sind hochkorreliert.

Tabelle 7-15: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Übermüdung

	VM2	VM5	VM6	VM10	VM12	VM13	VM14	VM15	VM23	VM24	VM29	VM31
Y_{13}	0,69	0,92	0,92	0,69	0,82	0,71	0,76	0,96	0,75	0,59	0,9	0,69

7.4.4.2 Getötete durch Alkoholeinfluss

In der Zielvariablen Y_{14} ist die Entwicklung der Getöteten durch Alkoholeinfluss enthalten. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_{14} zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Zielvariable ist ab 1992 in der Unfalldatenbank enthalten. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

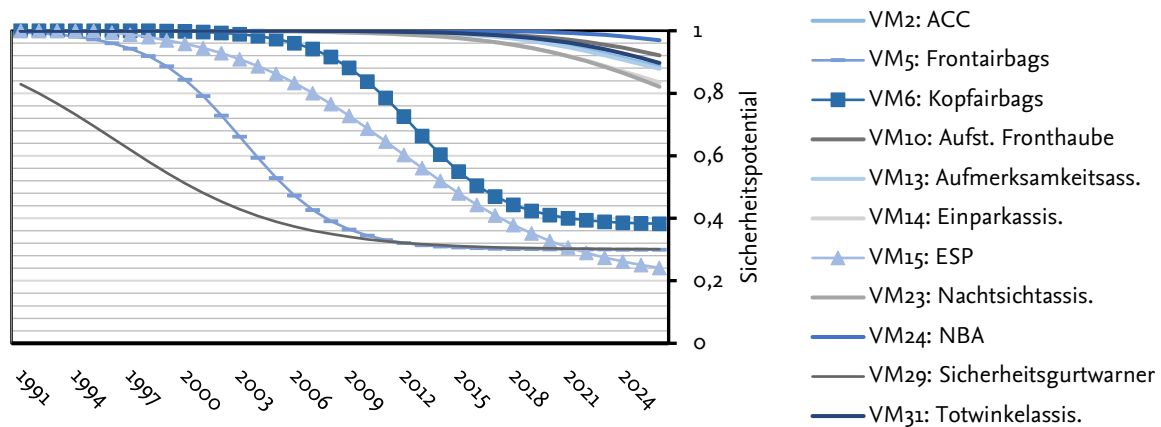


Abbildung 7-28: Sicherheitspotentiale bei Alkoholeinfluss

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann die in der Abbildung 7-29 bereitgestellte Prognose ermittelt werden. Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Der Trend von 2016 bis 2026 ist stagnierend. Von vormals 256 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 215 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 16%.

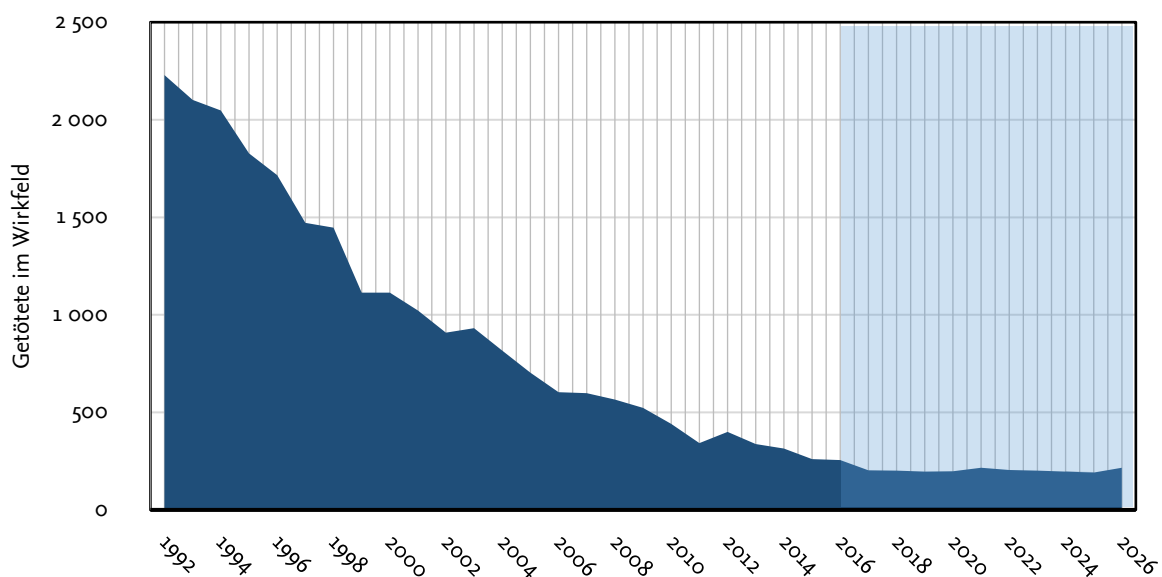


Abbildung 7-29: Prognose der Getöteten durch Alkoholeinfluss

Die Maßnahme VM15 (ESP) ist gering korreliert mit $r < 0,5$. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent) und VM29 (Gurtwarnsystem) sind gut korreliert. Die Maßnahmen VM2 (ACC), VM10 (aufstellbare Fronthaube), VM14 (Einparkassistent), VM23 (Nachtsichtassistent), VM24 (Notbremsassistent) und VM31 (Totwinkelassistent) sind hochkorreliert.

Tabelle 7-16: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Alkoholeinfluss

	VM2	VM5	VM6	VM10	VM13	VM14	VM15	VM23	VM24	VM29	VM31
Y14	0,79	0,58	0,52	0,73	0,69	0,78	0,48	0,77	0,83	0,63	0,74

7.4.4.3 Getötete durch Baum-Aufprall

Die Zielvariable Y_{15} beinhaltet die Entwicklung der Getöteten durch Kollisionen mit Bäumen. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_{15} zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Erhebung dieses Wirkfelds in der Unfalldatenbank ist erst ab 1996 erfolgt. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

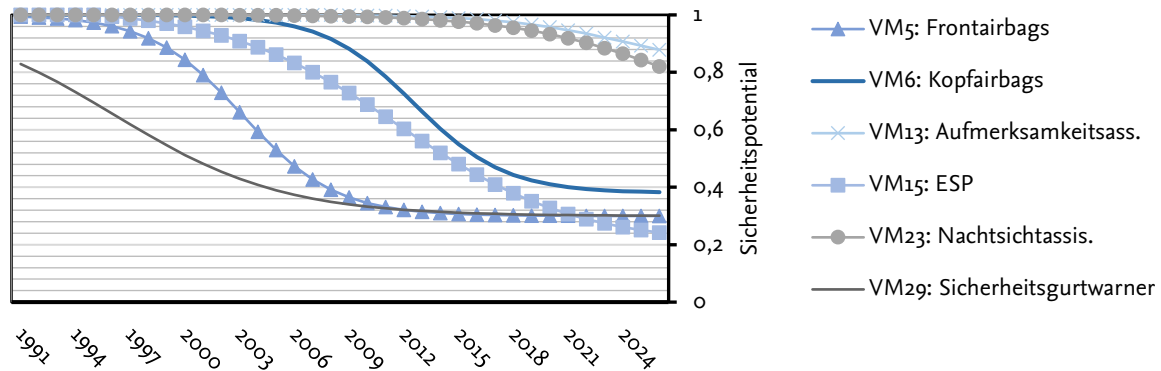


Abbildung 7-30: Sicherheitspotentiale bei Baumunfällen

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann folgende Prognose ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-31): Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Das typische Schwanken der Originalzeitreihe wird wiedergegeben. Um 2025 ist ein deutlicher Abfall des Getötetenaufkommens zu sehen. Der Trend von 2016 bis 2026 ist fallend. Von vormals 603 Getöteten in 2016 kann die Opferanzahl auf ca. 128 in 2026 reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 70%.

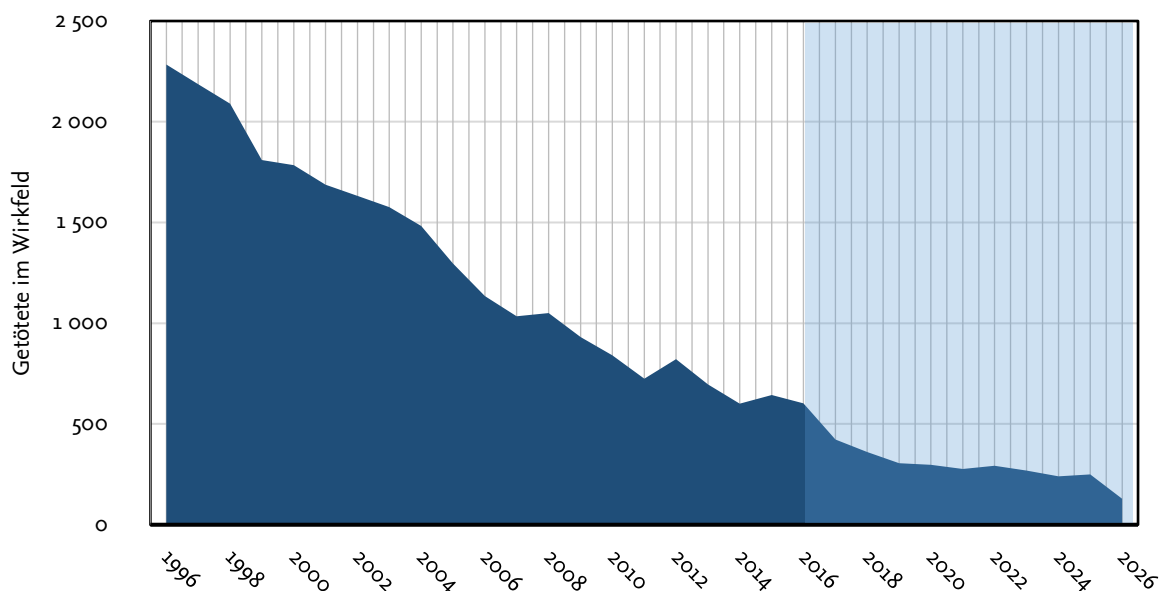


Abbildung 7-31: Prognose der Getöteten durch Baumunfälle

Alle im Wirkfeld enthaltenen Maßnahmen zeigen gute korrelative Zusammenhänge zur Entwicklung der Getöteten. Die Maßnahme VM13 (Aufmerksamkeitsassistent) weist eine gute Korrelation auf. Die Maßnahmen VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM15 (ESP), VM23 (Nachtsichtassistent) und VM29 (Gurtwarnsystem) weisen sehr gute Korrelationswerte auf.

Tabelle 7-17: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Baumunfälle

	VM5	VM6	VM13	VM15	VM23	VM29
Y15	0,96	0,9	0,67	0,95	0,71	0,95

7.4.4.4 Getötete durch Wildunfälle

Die Zielvariable Y_{16} beinhaltet die tödlichen Unfälle durch Wildunfälle. Anhand der Wirkungsfeldmatrix A wird die Zielvariable Y_{16} zur Erstellung des neuronalen Netzes entsprechend dem Algorithmus aus Abschnitt 6.4.2 gegeben. Die Erhebung dieses Wirkfelds in der Unfalldatenbank ist erst ab 1996 erfolgt. Die Sicherheitspotentiale im Wirkfeld sind folgend dargestellt:

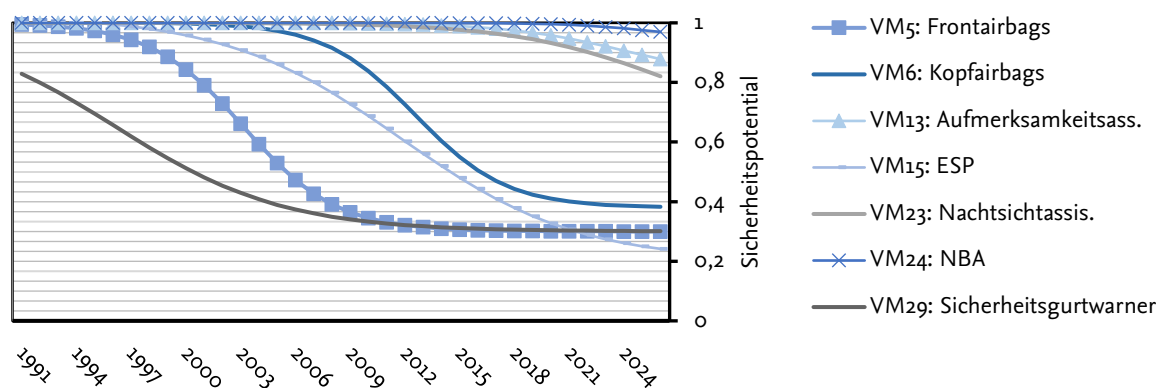


Abbildung 7-32: Sicherheitspotentiale bei Wildunfällen

Nach Erstellung des neuronalen Netzes und Optimierung durch den genetischen Algorithmus kann folgende Prognose ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-33): Der Verlauf der Getöteten ab dem Prognosezeitpunkt 2016 sieht plausibel aus. Der Trend von 2016 bis 2026 ist stagnierend. Das Modell ermittelt ein Getötetenaufkommen in 2026 von ca. 2 Personen pro Jahr. Zwischen 2016 und 2026 schwängt das Aufkommen der Getöteten durch Wildunfälle zwischen 8 bis 13 Personen jährlich. In 2016 sind 16 Menschen durch Wildunfälle tödlich verunglückt.

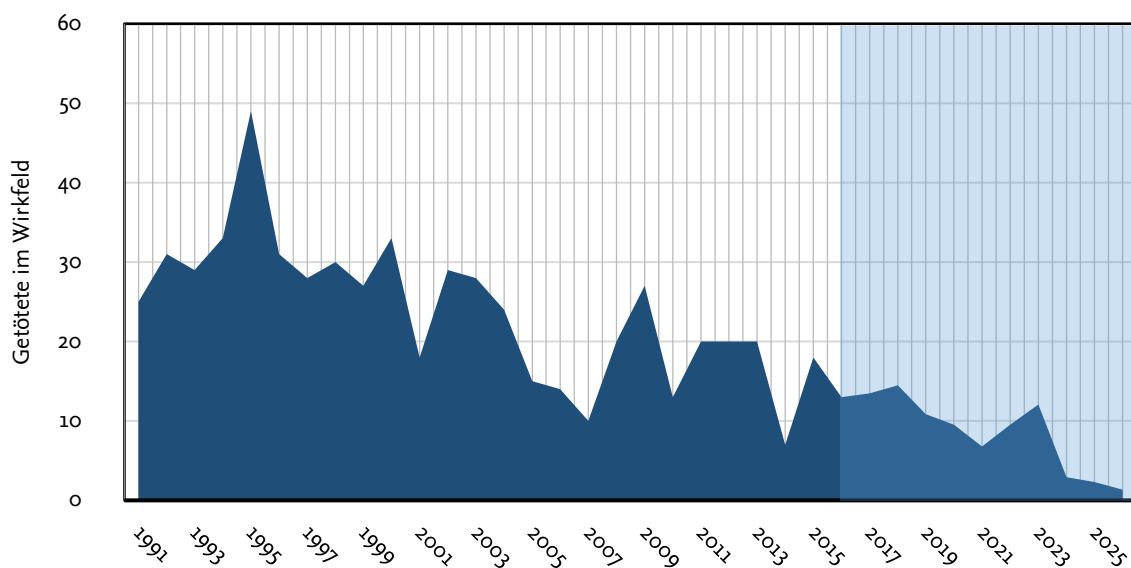


Abbildung 7-33: Prognose der Getöteten durch Wildunfälle

Die Maßnahme VM24 (Notbremsassistent) zeigt einen guten Korrelationswert. Alle übrigen Maßnahmen weisen sehr gute Korrelationswerte auf. Diese Maßnahmen sind VM5 (Frontairbags), VM6 (Kopfairbags), VM13 (Aufmerksamkeitsassistent), VM15 (ESP), VM23 (Nachtsichtassistent) und VM29 (Gurtwarnsystem).

Tabelle 7-18: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Wildunfälle

	VM5	VM6	VM13	VM15	VM23	VM24	VM29
Y16	0,78	0,77	0,7	0,81	0,72	0,62	0,76

7.5 Implikationen für Entscheidungsträger

Nachdem die zentralen Prognoseergebnisse deskriptiv dargelegt sind, können auf den gewonnen Erkenntnissen Implikationen für Entscheidungsträger (vgl. Abschnitt 1.2) entwickelt werden. Ziel dieser Implikationen ist es Problemfelder aufzuzeigen und mögliche Handlungsoptionen in den jeweiligen Wirkungsfeldern zu bestimmen.

7.5.1 Empfehlungen für infrastrukturspezifische Wirkungsfelder

Alle infrastrukturspezifischen Wirkungsfelder weisen hohe Korrelationswerte zu den Maßnahmen der passiven Sicherheit im Fahrzeug auf (Front- und Kopfairbags, Gurtwarnsystem). Die aktive Maßnahme ESP greift hier auch hochkorrelativ in alle infrastrukturspezifischen Wirkungsfelder ein. Abgesehen vom Kopfairbag zeigen die Sicherheitspotentialkurven allerdings, dass der erreichte Grad des Sicherheitsgewinns dieser Maßnahmen größtenteils erzielt worden ist. Das Potential zur Verbesserung der Verkehrssicherheit durch die benannten Maßnahmen ist ausgeschöpft.

Ein infrastrukturspezifischer Handlungsschwerpunkt ist entsprechend der Prognose der Baustellenbereich. Das Prognosemodell sieht denselben Wert der Verkehrssicherheit im Baustellenbereich bis ins Jahr 2026. Bis dahin wird ein stagnierender Trend vorhergesagt. Diese Entwicklung wird damit begründet, dass aktuell primär Maßnahmen ergriffen werden, welche die Fahrzeuginsassen schützen, nicht aber Verkehrsobjekte außerhalb des Fahrzeugs im Baustellenbereich. Die in diesem Wirkungsfeld getroffenen verkehrsmittelseitigen Maßnahmen sind nicht ausreichend, um die Verkehrssicherheit hier zu verbessern.

Gute Verbesserungen der Verkehrssicherheit lassen sich für die Wirkungsfelder außerhalb von Ortschaften, auf Autobahnen und auf Kreisstraßen feststellen. Für die Entwicklung der tödlich Verunglückten außerhalb von Ortschaften ist entsprechend der Prognose eine Verbesserung um ca. 50% bis ins Jahr 2026 zu erwarten. Auch am Markt noch neuere Assistenzsysteme, wie das Tagfahrlicht und der Nachtsichtassistent, zeigen bereits hohe korrelative Einflüsse auf die Entwicklung der Verkehrssicherheit (trotz geringer Systempenetrationsraten). Maßnahmen wie das ACC, der Aufmerksamkeitsassistent, der Notbremsassistent und der Totwinkelassistent zeigen bis ins Prognosejahr 2026 wenig Wirkung hinsichtlich der Korrelationen. Die Entwicklung der Getöteten auf Autobahnen kann bis 2026 auf ca. 40% des heutigen Aufkommens reduziert werden. Weniger verbreitete Maßnahmen, wie das Tagfahrlicht und der Nachtsichtassistent, weisen bereits jetzt hohe Korrelationswerte auf. Die Maßnahmen ACC, Aufmerksamkeitsassistent, Notbremsassistent, Reifendruckkontrollsystem und Totwinkelassistent haben bis zum Prognosehorizont 2026 eine geringere Sicherheitswirkung. Das Verbesserungspotential der Getöteten auf Kreisstraßen wird bis ins Jahr 2026 auf 45% bestimmt. Basierend auf den Korrelationswerten

und aktuellen Systempenetrationsgraden wird erwartet, dass eine Verbesserung der Verkehrssicherheit durch die Maßnahmen ACC, Tagfahrlicht, Aufmerksamkeitsassistent, Nachtsichtassistent, Notbremsassistent, Reifendruckkontrollsystem und Totwinkelassistent erreicht werden kann.

Sehr gute Verbesserungen der Verkehrssicherheit bis ins Jahr 2026 werden innerhalb von Ortschaften und auf Bundesstraßen erwartet. Die Wirkfelder innerhalb von Ortschaften und auf Bundesstraßen werden durch die aktuellen Maßnahmen und deren Systempenetrationsgrade effektiv verbessert. Innerhalb von Ortschaften ist eine Reduktion der Verkehrsunfallzahlen von 60% zum Basisjahr 2026 zu erwarten. Es konnte hier ein korrelativer Einfluss der Maßnahmen ACC, der aufstellbaren Fronthaube, dem Aufmerksamkeitsassistenten, dem Einparkassistenten, dem Nachtsichtassistenten, dem Reifendruckkontrollsystem und dem Totwinkelassistent identifiziert werden. Die Systempenetration der benannten Maßnahmen ist bis zum Prognosehorizont relativ gering. Eine Förderung der aktiven Maßnahmen sollte zu einer weiteren Verbesserung der Verkehrssicherheit führen können. Die Entwicklung der Getöteten auf Bundesstraßen bis ins Jahr 2026 wird als ebenfalls positiv prognostiziert. Es ist ein Reduktionspotential von knapp 60% zum aktuellen Unfallaufkommen vom Modell bestimmt worden. Der größte erwartete Sicherheitsgewinn der bisher wenig im System vertretenen Maßnahmen ist der Nachtsichtassistent. Weiterhin zeigen die Maßnahmen ACC, Tagfahrlicht, der Aufmerksamkeitsassistent sowie der Totwinkelassistent korrelative Sicherheitswirkungen. Demzufolge scheint die Förderung von Maßnahmen, die die Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens durch den Fahrer verbessern, auf den Bundesstraßen zu deutlich höherer Verkehrssicherheit zu führen.

7.5.2 Empfehlungen für Transportmodenübergänge

Die Entwicklung der Verkehrssicherheit kann auf Basis der Modellergebnisse nicht für die Wirkfelder Bahnübergänge und Fußgängerüberwege herangezogen werden. Das Modell bestimmt für die Entwicklung der Getöteten an Fußgängerüberwegen einen fallenden Trend mit einem Reduktionspotential von ca. 50% des gegenwärtigen Unfallaufkommens. Aufgrund des Antwortverhaltens des neuronalen Netzes wird dieser Prognose nicht vertraut. Es kann daher keine Empfehlung für Maßnahmen an Fußgängerüberwegen getroffen werden. Allerdings ist das absolute Unfallaufkommen in diesem Wirkfeld relativ gering (<20 Getötete pro Jahr).

Das Aufkommen mit Getöteten an Bahnübergängen zeigt ein Reduktionspotential von 76% gegenüber dem Basisjahr 2016. Die im Wirkfeld verorteten Maßnahmen zeigen mindestens gute korrelative Zusammenhänge. Es ist allerdings fraglich, inwieweit die Maßnahmen tatsächlich einen Effekt im Wirkfeld ausüben, oder die sehr positive Entwicklung durch Maßnahmen seitens der Schienenverkehrsindustrie begründbar ist.

7.5.3 Empfehlungen für witterungsspezifische Wirkfelder

Hinsichtlich der witterungsspezifischen Wirkfelder lässt sich ein Problemfeld identifizieren: Zwar stellt das Unfallaufkommen bei Nebel eine relativ kleine Gruppe der tödlich Verunglückten im Straßenverkehr mit ca. 10 Personen pro Jahr dar, die Prognose zeigt hier einen stagnierenden Trend. So wird bis 2026 eine potentielle Reduzierung der Getöteten um nur 9% erwartet. Die einzige hochkorrelierte Maßnahme ist das Gurtwarnsystem. Der Großteil der Maßnahmen im Wirkfeld üben geringere Wirkungen auf das Unfallgeschehen aus. Das Sicherheitsgeschehen

in diesem Wirkfeld wird folglich bis 2026 von keiner vorhandenen Maßnahme effektiv verbessert. Aufgrund der geringen Korrelationen ist auch nicht zu erwarten, dass gesteigerte Systempenetrationsgrade der betrachteten Maßnahmen einen positiven Effekt hervorrufen werden.

Hinsichtlich des Aufkommens von Unfällen mit Getöteten bei Tageslicht kann dieses Wirkfeld von 2016 bis 2026 um 26% verbessert werden. Zu der Gruppe der hochkorrelierten Maßnahmen wird in diesem Wirkfeld das Tagfahrlicht identifiziert. Weitere Maßnahmen, wie das ACC, die aufstellbare Fronthaube, der Aufmerksamkeitsassistent, der Notbremsassistent und der Totwinkelassistent zeigen gute Korrelationen. Es ist bis ins Jahr 2026 wiederum nicht zu erwarten, dass ein stärkerer Sicherheitseffekt durch die benannten Maßnahmen erzielt wird, weil die Systempenetrationsrate nicht ausreichend schnell ansteigt.

Eine gute Entwicklung zeigt sich bei der Reduktion der Unfälle bei Dämmerung und Dunkelheit: Die Gruppe der Getöteten bei Dämmerung ist eine relativ kleine Gruppe, dennoch zeigt das Prognosemodell hier ein Reduktionspotential des Unfallaufkommens von 67%. Aus der Gruppe der gut korrelierten Maßnahmen weist den höchsten Korrelationskoeffizient das Tagfahrlicht auf. Somit ist nachweislich gezeigt, dass eine Förderung dieser Maßnahme zu einer kurzfristigeren Verbesserung der Verkehrssicherheit bei Dämmerung führen kann. Die Entwicklung der Getöteten bei Dunkelheit lässt sich im Prognosehorizont bis 2026 um ca. 60% reduzieren. Trotz der geringen Marktdurchdringung kann bereits ein hochkorrelativer Zusammenhang zum Verlauf der Sicherheitspotentialkurve des Nachtsichtassistenten gesehen werden. Eine stärkere Förderung dieser Maßnahme kann zu einer weiteren Verbesserung der Sicherheit bei Dunkelheit führen.

7.5.4 Empfehlungen für ursachenspezifische Wirkfelder

Leider kann aufgrund der Modellergebnisse hinsichtlich der Entwicklung der Getöteten durch Übermüdung keine Aussagen getroffen werden. Aufgrund des relativ geringen Aufkommens, wird der Prognose hier nicht vertraut.

Im Bereich der ursachenspezifischen Wirkfelder lassen sich zwei zentrale Problemfelder identifizieren: Die Entwicklung der Getöteten durch Alkoholeinfluss sowie Wildunfälle werden nicht signifikant verbessert. Entsprechend der Vorhersage des Modells wird sich die Zahl der Getöteten durch Alkoholeinfluss im Prognosehorizont bis 2026 nicht verbessern. Das Modell erwartete hier ein Unfallreduktionspotential von ca. 16%. Entgegen den anderen Wirkfeldern zeigen hier erstmals die Maßnahmen der passiven Sicherheit deutlich schwächere Korrelationen als die moderneren Verkehrsmittelmaßnahmen. Tatsächlich zeigt das ESP hier den geringsten korrelativen Zusammenhang auf. Der Notbremsassistent weist in diesem Wirkfeld bereits einen deutlichen korrelativen Einfluss auf die Entwicklung der Sicherheit auf. Um dieses Wirkfeld zu verbessern, wird empfohlen den automatischen Notbremsassistenten stärker ins Verkehrssystem zu bringen. Aufgrund der mangelnden Datengrundlage wurde das Alcolock nicht in die Prognose der Verkehrssicherheit einbezogen. Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit unterstützen wiederum, dass diese Maßnahme durchaus notwendig wird, um das Wirkfeld der Unfälle durch Alkoholeinfluss verbessern zu können. Das zweite Problemfeld, welches allerdings aufgrund seiner absoluten Getötetenzahlen als sekundär eingeschätzt wird, sind die Unfälle mit Getöteten durch Wild auf der Fahrbahn: Das Prognosemodell erwartet eine stagnierende Entwicklung der Getöteten. Maßnahmen wie der Aufmerksamkeitsassistent können bereits eine gute korrelative Sicherheitswirkung erzielen und sollten für dieses Wirkfeld gefördert werden.

Eine positive Entwicklung der Getöteten wird im Bereich der Baumunfälle erwartet: Das Prognosemodell bestimmt in dem Wirkfeld eine deutliche Verbesserung zum Basisjahr 2016. Es wird prognostiziert, dass bis ins Jahr 2026 eine Reduktion der tödlich Verunglückten von gut 70% erreicht werden kann. Auch bereits die noch relativ gering im Verkehrssystem vertretenen neueren Assistenzsysteme (z. B. Aufmerksamkeitsassistent) zeigen einen hochkorrelativen positiven Effekt auf die Sicherheit. Bereits [Martens 2011] hat in seinen Arbeiten über die Ursachen von tödlichen Verkehrsunfällen darauf hingewiesen, dass es bisher kein spezifisches Assistenzsystem gibt, was nicht nur die Aufmerksamkeit des Fahrers überwacht, sondern gezielt die Aufmerksamkeit des Fahrers auf potentielle Gefährdungsquellen lenkt. Diese Typ Maßnahme scheint im Bereich der ursachenspezifischen Wirkfelder auch auf Basis der Prognoseergebnisse zu kurzfristigen Verbesserungen der Verkehrssicherheit führen zu können.

7.6 Ausblick hochautomatisiertes Fahren

In der aktuellen Diskussion über die Möglichkeiten zur Steigerung der Verkehrssicherheit gilt seitens der Industrie und Gesetzgeber das hochautomatisierte Fahren als Schlüsseltechnologie [acatech 2015] [Maurer et.al. 2015]. Um die rechtliche Grundlage für die Zulassungsfähigkeit hochautomatisierter Systeme im Straßenverkehr zu schaffen, wurde in der Novellierung des Straßenverkehrsgesetzes (StVG) vom 17. August 2017 der Paragraph *§ 1a Kraftfahrzeuge mit hoch- oder vollautomatisierter Fahrfunktion* ergänzt. In dem hier vorgenommenen Ausblick soll die Fragestellung erörtert werden, inwieweit die Verkehrssicherheit unter Einführung von HAF (hier identifiziert als VM_34) sich entwickeln wird. Es wird die Annahme getroffen, dass der erwartete Sicherheitsgewinn von HAF bei 100% liegt, d. h. durch HAF wird es möglich sein alle Arten von Unfällen zu verhindern. Weiterhin wird angenommen, dass HAF im Bezugsjahr 2014 eingeführt wird und bereits ein geringer Anteil der Maßnahme im Verkehrssystem vorhanden ist. Zur Bestimmung der Sicherheitspotentialkurve werden Parameter aus Tabelle 7-19 festgelegt.

Tabelle 7-19: Parameter für hochautomatisiertes Fahren

ID	Maßnahme	t_0	$M(t)$	S
VM_34	Hochautomatisiertes Fahren	2014	0,04% (2016)	100%

Als Zielvariable wird hier das neue Wirkfeld Y17 der Getöteten im Straßenverkehr herangezogen. Entsprechend dem definierten Wirkungsfeldvektor und dem definierten Algorithmus wird das neuronale Netz aufgebaut. Da hier das Gesamtaufkommen von Getöteten im Straßenverkehr prognostiziert werden soll, werden alle Sicherheitspotentialkurven an das Netz gegeben. Die aufgestellte Prognose zeigt das Aufkommen der Getöteten von 2016 bis 2051 (Prognosehorizont 35 Jahre).

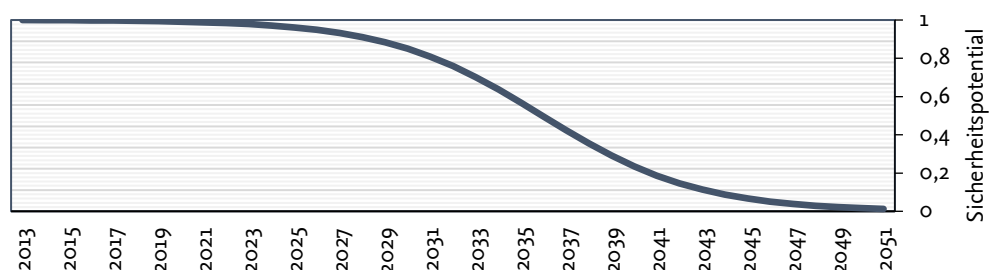


Abbildung 7-34: Sicherheitspotential von HAF

Es ist hier hervorzuheben, dass die getätigte Genauigkeit der Prognose bei steigendem Prognosehorizont abnimmt (vgl. Abschnitt 8.1). Der Trend der Prognose zeigt eine sich kontinuierlich verbessernde Verkehrssicherheit, vgl. Abbildung 7-35. Dabei bildet das neuronale Netz das prognostizierte Verhalten des Systems ähnlich der Originalzeitreihe Y₁₇ ab. Tödliche Unfallereignisse können bis ins Jahr 2046 auf >10 reduziert werden.

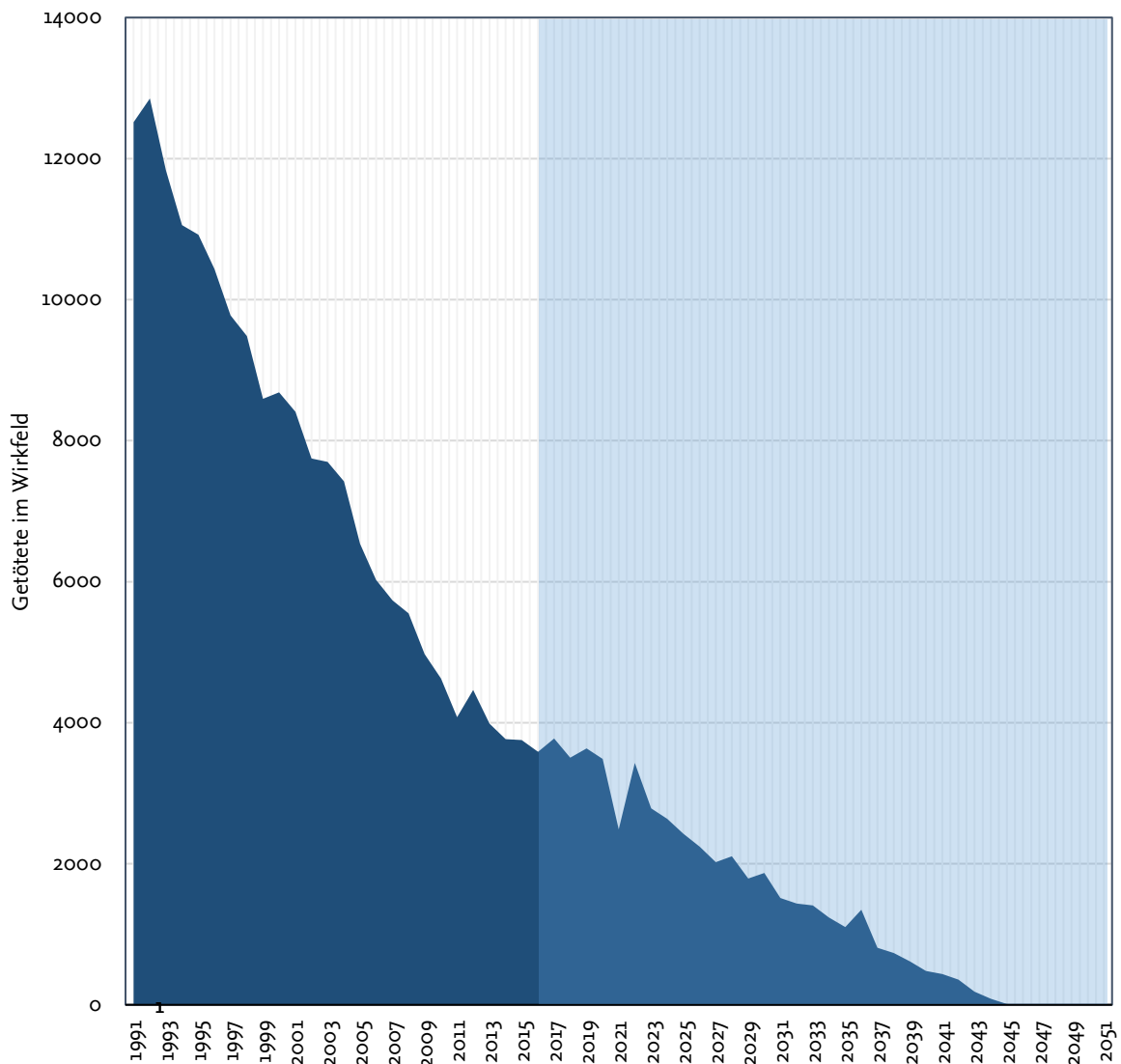


Abbildung 7-35: Prognose der Getöteten unter Einfluss von HAF

Anhand der Kurvenverläufe ist zu erkennen, dass aktuell verfügbare Maßnahmen bis ca. 2040 erst ihr maximales Sicherheitspotential erreichen. Gleichfalls sind in 2046 die Maßnahmen HAF noch nicht vollständig im Verkehrssystem penetriert. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass ein Höchstmaß erreichbarer Verkehrssicherheit bereits vor der vollständigen Automatisierung des Straßenverkehrs erreicht werden kann.

8 Kritische Würdigung und weiterer Forschungsbedarf

„Falls Gott die Welt geschaffen hat, war seine Hauptsorge sicher nicht, sie so zu machen, dass wir Sie verstehen können.“

(Albert Einstein)

8.1 Prüfung der Anforderungen an das Prognoseverfahren und kritische Würdigung

Im Rahmen der durchgeführten Arbeit sind Anforderungen an das zu entwickelnde modellbasierte Prognoseverfahren der Straßenverkehrssicherheit erarbeitet worden, welche im Rahmen der Verfahrenskonzeption (siehe Kapitel 6) und exemplarischen Anwendung (siehe Kapitel 7) validiert werden sollten. Das entwickelte Prognoseverfahren zeigt insgesamt einen hohen Erfüllungsgrad gegenüber den Anforderungen, es gibt allerdings Schwächen und Abweichungen von den Anforderungen auf die im Folgenden eingegangen wird:

- *Theoretische Grundlagen*

Die Grundannahme hinsichtlich der Prognostizierbarkeit der Verkehrssicherheit wird damit begründet, dass diese emergente Eigenschaft eine kollektive Sollgröße des Verkehrssystems darstellt. Weiterhin weist das Verkehrssystem Eigenschaften eines regelbaren Systems im Sinne der Systemtheorie auf, welches gezielt beeinflusst werden kann. Alle am Verkehr beteiligten Akteure agieren mit der Intention die Verkehrssicherheit zu erhöhen. [Dekker et. al. 2011] hebt hervor, dass:

„Accidents have similarly been characterized as emergent properties of complex systems. They cannot be predicted on the basis of the constituent parts.“ nach [Dekker et.al. 2011]

Die Arbeit nimmt eine aggregierte/mikroskopische Perspektive auf die Verkehrssicherheit ein und postuliert, dass die Entwicklung der Verkehrssicherheit aufgrund vom Vorhandensein sicherheitsförderlicher Maßnahmen prognostiziert werden kann. Was die Arbeit hier nicht leistet, ist gegensätzliche Effekte zu bestimmen. Zwar sieht der Maßnahmenkatalog von [Grune 2016] vor, auch diese Effekte zu benennen, diese Arbeit entwickelt wiederum kein Konzept, was diese Effekte evaluiert.

- *Maßnahmenkatalog*

Der Output des Wirkungsmoduls ist primär von der Datenqualität des Maßnahmenkatalogs abhängig. Es konnte bereits im Rahmen der Maßnahmen-Qualifizierung (Abschnitt 6.2) gezeigt werden, dass nur ein geringer Anteil der identifizierten Maßnahmen mit einer ausreichenden Datenbasis ausgestattet ist, welche die Sicherheitspotentiale bestimmen können.

Der Anspruch lag darin ausschließlich auf belegbare Informationen zuzugreifen. Eine breitere Einbindung von Maßnahmen anderer Verkehrskonstituenten wäre unter Zuhilfenahme von Annahmen möglich gewesen.

- *Sicherheitspotential*

Das im Rahmen dieser Arbeit definierte risikometrische Maß des Sicherheitspotentials nutzt den erwarteten Sicherheitsgewinn und den Verlauf der Systempenetration. Letzteres wurde mittels des Bass-Diffusionsmodells modelliert. Dieses liefert letztlich S-förmige Kurvenverläufe für die Sicherheitspotentiale. Dies induziert wiederum, dass das Sicherheitspotential einer Maßnahme kontinuierlich höher wird. Es kann die Fragestellung erhoben werden, ob insbesondere für nicht verkehrsmittelseitige Maßnahmen auch andere Systempenetrationsverläufe anwendbar sind. Denkbar sind hier auch sog. Badewannenverläufe, welche implizieren, dass eine Maßnahme zu einer temporären Verbesserung des Sicherheitspotentials, nicht aber zu einer konsequent kontinuierlichen Verbesserung führt.

- *Methode GABP*

Zwar bieten die neuronalen Netze den Vorteil mit einer großen Menge von Input-Variablen umgehen zu können, aufgrund ihrer mathematischen Natur erfordern sie jedoch Prädiktorvariablen, um eine in der Zukunft liegende Systemantwort bestimmen zu können. Man muss die zukünftige Entwicklung mehrerer Werte bereits kennen, um das unbekannte Verhalten einer anderen Variable vorherzusagen [Montgomery u. Jennings 2015]. Zwar konnte durch Anwendung der genetischen Algorithmen die Optimierungsproblematik der neuronalen Netze verbessert werden, dennoch handelt es sich hierbei um eine nichtlineare Methode, welche bei gleicher Anwendung immer wieder unterschiedliche Ergebnisse liefert.

Ein weiterer Nachteil der neuronalen Netze besteht darin, dass die Zusammenhänge der Ergebnisse in den Gewichtungen nicht nachvollziehbar sind; daher kann nicht direkt darauf geschlossen werden, was genau das Netz gelernt hat [Eisenbach 2005].

- *Methode GST*

Mittels Anwendung eines $GM(1,1)$ wurde der Umstand behoben, dass das Neuronale Netz Prädiktorvariablen für die zukünftigen Zeitschritte benötigt. Zwar wurden die Kausalzeitreihen für die Eignungsfähigkeit einer $GM(1,1)$ -Prognose qualifiziert, dennoch nutzt das neuronale Netz Prädiktorvariablen, die wiederum selbst mittels eines Prognoseverfahrens vorhergesagt worden sind. Hier stellt sich die Fragestellung, inwieweit sich die Prognoseergebnisse des neuronalen Netzes durch unterschiedliche Prognoseverfahren der Kausalzeitreihen verändert hätten.

- *Verwendung der Kausalzeitreihen*

Als Prädiktorvariablen an das Multilayer Perceptron Netz sind neben den Zeitreihen der Sicherheitspotentiale eine Reihe von Kausalzeitreihen bestimmt worden. Da diese nicht für den gesamten Prognosehorizont bekannt sind, wurde diese mittels eines $GM(1,1)$ prognostiziert. Es stellt sich hier allerdings die Frage, inwieweit diese Kausalzeitreihen für die Wirkfeld-Prognose erforderlich sind oder die Sicherheitspotentiale zur Prognose der Zielvariablen bereits ausreichend sind. Die Motivation hinter der Einbindung der Kausalzeitreihen war, weitere das Verkehrssystem beschreibende Informationen an das neuronale Netz zu stellen. Es bleibt hier ggf. eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, welche die Prognoseergebnisse mit und ohne Kausalzeitreihen erarbeitet.

- *Exemplarische Anwendung*

Die exemplarische Anwendung zeigt das Verfahren aufgrund der mangelnden Datengrundlage nur für verkehrsmittelseitige Maßnahmen. Zwar kann auf Basis der theoretischen Grundlage gezeigt werden, dass die Prognose auch unter Einbindung von Maßnahmen der

weiteren Verkehrskonstituenten erfolgen kann; dies wurde praktisch nicht gezeigt. Damit widerspricht das Verfahren zwar nicht den gestellten Anforderungen, allerdings konnten die Anforderungen hinsichtlich der Anwendbarkeit für alle Verkehrskonstituenten nicht validiert werden.

Weiterhin wurden spezifische Wirkfelder ausgewählt, mit dem Anspruch ein möglichst repräsentatives Unfallaufkommen zu betrachten. Durch eine Erweiterung der Wirkfelder wären spezifische Erkenntnisse über die Entwicklung der Verkehrssicherheit möglich gewesen. In der exemplarischen Anwendung haben sich zwei Wirkfelder gezeigt, deren Systemantworten nicht den typischen Verlauf der Originalzeitreihen wiedergegeben haben. Die Aussagen dieser Wirkfelder wurden abgelehnt. Es ist weiter zu eruieren, warum das neuronale Netz genau in diesen Wirkfeldern keine plausible Prognose herstellen kann. Hierin erfüllt das Verfahren nicht die formulierten Anforderungen, da nicht validiert werden konnte, dass das Verfahren für jedes Wirkfeld anwendbar ist.

- *Praktisches Verfahren zur Erstellung der Prognose*

Die praktische Umsetzung der Multilayer Perceptron Netze erfolgte mittels einer Kette von Tools und Funktionen, die bisher nicht miteinander effizient gekoppelt werden konnten. Daher sind zahlreiche Schritte in der Erstellung der Prognosen manuell umzusetzen. Die ineffiziente Kopplung der Tools erschwert daher eine kurzfristige Anwendung der Methode auf neue Maßnahmen, die bisher nicht im definierten Betrachtungsumfang der Arbeit enthalten sind.

8.2 Weiterer Forschungsbedarf

Hinsichtlich des identifizierten weiteren Forschungsbedarfs im Nachgang dieser Arbeit kann zwischen methodenspezifischen Anpassungen und alternativen Verfahren zur Verkehrssicherheitsprognose unterschieden werden.

Methodenspezifischer Forschungsbedarf

Der Maßnahmenkatalog hat gezeigt, dass es im deutschen Verkehrsraum keine systematische Erhebung aller verfügbaren Maßnahmen oder eine vereinheitlichte Darstellung der Sicherheitsgewinne gibt. Seitens der Automobilhersteller wird dieser Aspekt gut durch die simulationsbasierten Wirkungsanalysen abgedeckt, vgl. [Kohsiek et.al. 2011]. Die Maßnahmen der übrigen Verkehrskonstituenten unterliegen wiederum keinem vergleichbaren Verfahren, weshalb praktisch die Wirkungen dieser Konstituentenmaßnahmen nicht abschätzbar sind. Hierzu wäre folglich einerseits ein einheitlicher Maßnahmenkatalog zu schaffen und andererseits auch im Rahmen der simulationsbasierten Wirkungsanalysen betreffende Maßnahmen zu evaluieren. Dies betrifft auch die Abbildbarkeit von gegensätzlichen Effekten von Sicherheitsmaßnahmen.

Ein weiterer Forschungsbedarf besteht somit in der Erarbeitung einer Risikopotentialkurve, welche die durch eine Maßnahme ins System gebrachten Unsicherheiten quantifiziert (sicherheitsaverse Effekte). Über ein solches Maß wäre auch die Bewertung von Technologien und Maßnahmen im Verkehrssystem möglich, welche nicht primär zur Steigerung der Sicherheit vorgesehen sind (z. B. Ablenkung durch Entertainment-Systeme).

Die in dieser Arbeit gezeigten Prognosen basieren auf den Jahresgängen der Unfalldatenbank. Wiederum gibt es Maßnahmen, welche nicht ganzjährig eine Sicherheitswirkung generieren, z. B. Winterreifen. Daher wäre ein weiterer Forschungsbedarf die Anwendung des Verfahrens

auf eine Monatsgang-Perspektive. Dies würde eine weitere Anpassung der Sicherheitspotentialkurven erfordern, da jetzt Maßnahmen zyklisch im System wirken.

Das Verfahren könnte ebenfalls durch Verwendung von In-Depth Unfalldatenbanken, wie der GIDAS profitieren. Durch mehr Informationen über das Verkehrsunfallgeschehen könnten die an das Model gegebenen Informationen verbreitert werden, bzw. deutlich mehr Attribute in die Prognose einbezogen werden, als es auf Basis der verwendeten öffentlichen Unfalldatenbank möglich ist. Die Übertragung des Verfahrens auf andere Verkehrsräume durch Nutzung weiterer öffentlicher Unfalldatenbanken liefert ebenfalls einen weiteren Forschungsbedarf. So hebt die [WHO 2015] hervor, dass global gesehen die Verkehrssicherheit zu einer der fünf Haupttodesursachen bis ins Jahr 2030 avanciert. Es bedarf daher einer differenzierten Betrachtung in den relevanten Verkehrssystemen, welche Maßnahmen vorhanden sind und inwieweit sich die Trends der Verkehrssicherheit entwickeln.

Forschungsbedarf alternativer Verfahren

Hinsichtlich des identifizierten Forschungsbedarfes zur Anwendung alternativer Prognoseverfahren wird im Folgenden das Konzept für eine simulationsbasierte Prognose der Verkehrssicherheit vorgestellt, welche konzeptionell in der Lage sein soll, Aussagen hinsichtlich der Entwicklung der Verkehrssicherheit für das gesamte Verkehrssystem tätigen zu können: Aus dem Bereich der Marketing-Forschung stammt das Konzept der sog. Testmärkte. Hierbei definiert sich ein Testmarkt wie folgt: Ein Testmarkt ist ein

„[...] Teil-Absatzmarkt, auf dem neuentwickelte Produkte probeweise eingeführt werden, um durch begleitende Befragungen und/oder Marktbeobachtungen das Einführungsrisiko auf dem Gesamtmarkt kalkulierbar zu machen. Anforderungen sind Repräsentativität (Bevölkerungs-, Wirtschafts-, Wettbewerbs- und Handelsstruktur), räumliche Abgegrenztheit und Unabhängigkeit (Überschneidungen von Einzugsgebieten) sowie Vergleichbarkeit der Mediastrukturen.“ nach [Gabler 2017]

Da bereits im Forschungsbereich der Wirkungsanalysen simulative Verfahren weit verbreitet und erprobt sind, ist es denkbar die Attribute eines Test-Absatzmarktes (insb. Repräsentativität) auf ein Simulationsmodell des Verkehrssystems zu übertragen. Demnach müsste ein für das deutsche Verkehrssystem repräsentatives virtuelles Straßennetz aufgebaut werden. Hierfür müsste zunächst erforscht werden, was repräsentierende Eigenschaften für ein Verkehrssystemmodell sind (z. B. Straßen-, Verkehrsleit-, Verkehrsobjekt- und Bevölkerungsstruktur). Die Parametrierung des repräsentativen Verkehrstestsystems ließe sich durch die in-depth Datenbanken umsetzen. Aufgrund der dort enthaltenen hohen Informationsverfügbarkeit über Unfallereignisse könnte realitätsgetreu das Modell erstellt werden. Das zu erstellende virtuelle Verkehrssystemmodell müsste in der Lage sein ein dediziertes virtuelles Fahrzeug- und Fahrermodell (Stufe C, vgl. Abbildung 8-1) abzubilden sowie ein virtuelles Infrastrukturmodell (Stufe B, Abbildung 8-1) des Verkehrssystems herzustellen. Die Induzierung von Maßnahmen (äquivalent den Testprodukten im Testmarkt) erfolgt in den Stufen B und C. Mittels des benannten Hochrechnungsverfahrens wird es möglich Aussagen über das Gesamtsystemverhalten zu treffen.

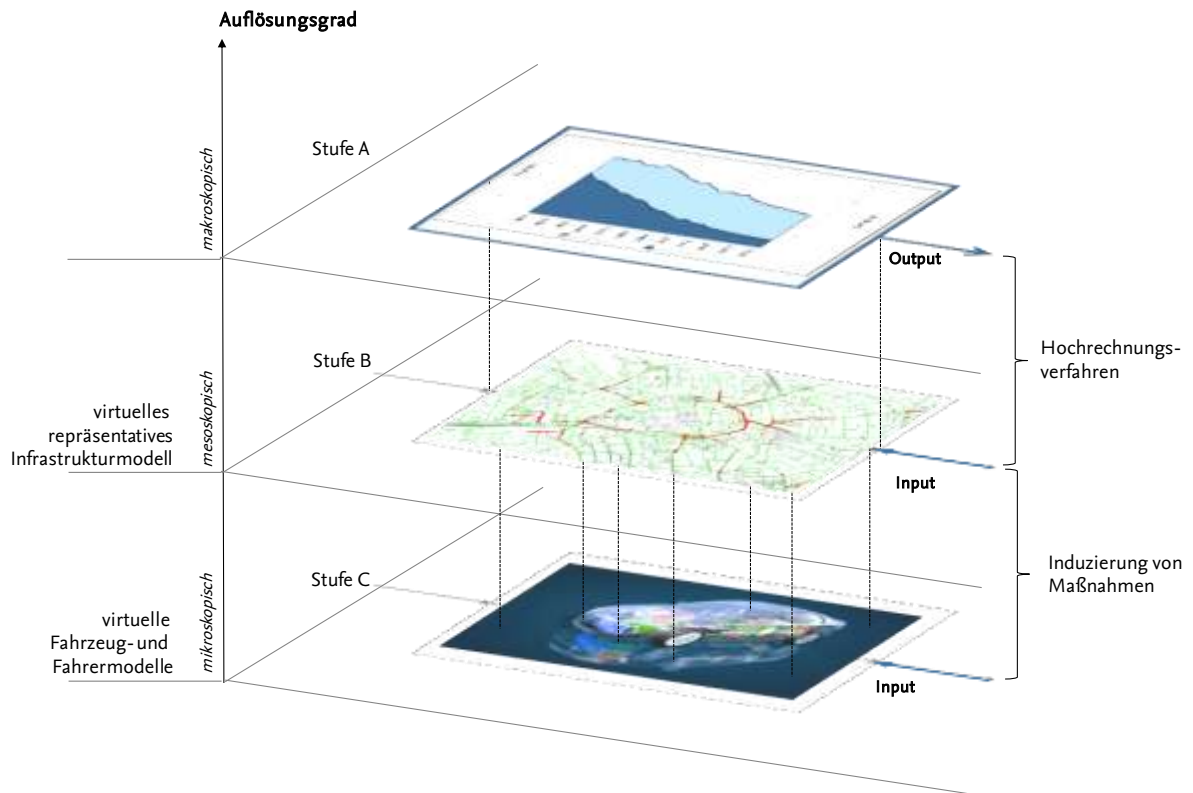


Abbildung 8-1: Konzept für ein repräsentatives virtuelles Verkehrssystemmodell

9 Zusammenfassung

"Es ist besser, unvollkommene Entscheidungen durchzuführen, als beständig nach vollkommenen Entscheidungen zu suchen, die es niemals geben wird."

(Charles de Gaulle)

Die vorliegende Dissertation entwickelt eine Methode zur modellbasierten Prognose der Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung der Wirkung von Maßnahmen an den Verkehrsmitteln, Verkehrsobjekten, der Verkehrsinfrastruktur sowie der Verkehrsorganisation – eine sog. Wirkungsfeld-Prognose. Motiviert wird die Arbeit von dem aktuell stagnierenden Trend der Verkehrssicherheit und dem Entscheidungsproblem von Politik und Fahrzeugherstellern, welche Maßnahmen gefördert werden sollten, um kurzfristig die Sicherheit zu verbessern. Ausgehend von einer technikphilosophischen Betrachtung wird festgestellt, dass die Verkehrssicherheit eine von allen am Verkehrssystem beteiligten Akteuren zu verbessernde Systemeigenschaft darstellt. Damit ist die Größe der Verkehrssicherheit zielkonfliktfrei, dies qualifiziert die Entwicklung der Sicherheit im Straßenverkehr als prognostizierbar. Dem theoretischen Verständnis über das Verkehrssystem wird die Kybernetik zugrundegelegt: Das Verkehrssystem kann als komplexes makroskopisches Mehrgrößenregelsystem verstanden werden. Es ist durch gezielte Maßnahmen zu beeinflussen.

Basierend auf den grundlegenden Wirkmechanismen des Verkehrssystems werden im Nachgang Prognoseverfahren und Wirkungsanalysen eruiert, die modelltheoretisch für das Verkehrssystem anwendbar sind. Es wird hier zwischen datenbasierten und modellbasierten Verfahren unterschieden: Datenbasierte Verfahren nutzen klassische Zeitreihenanalysen, Parameterschätzverfahren, künstliche neuronale Netze oder stochastische Modelle, um auf Basis von vergangenen Zeitreihen die Entwicklung des Systems vorherzusagen. Hingegen basieren modellbasierte Verfahren auf quantifizierenden Modellen der Wirkmechanismen des Systems und nutzen Zeitreihen ausschließlich zum Erkennen von Wirkmechanismen.

Die Arbeit konzipiert daraufhin ein modellbasiertes Verfahren der Verkehrssicherheitsprognose, welches neben der eigentlichen Prognose eine Wirkungsbestimmung vorsieht. Die Wirkung einer Maßnahme wird durch ein neues in dieser Arbeit definiertes Sicherheitspotential definiert: Das Sicherheitspotential beschreibt eine risikometrische Größe, welche über die zeitliche Entwicklung die erwartete sicherheitsförderliche Wirkung einer Verkehrssicherheitsmaßnahme beschreibt. Das Sicherheitspotential ist als ein funktionaler Zusammenhang in der Form einer fallenden S-Kurve basierend auf dem Zeitpunkt der Einführung einer Maßnahme, dem zeitlichen Verlauf der Systempenetration (vergleichbar mit dem Verlauf einer Marktpenetrationsskurve) und dem erwarteten maximalen Sicherheitsgewinn konzipiert. Durch das Konzept der Systempenetration entkoppelt die Arbeit modelltheoretisch die Entwicklung des Unfallaufkommens vom Verkehrsvolumen, was in klassischen Ansätzen der Verkehrssicherheitsprognose gängig ist. Weiterhin nutzt die Arbeit den Sicherheitsgewinn als Ausgangsgröße der klassischen

Wirkungsanalysen, um so eine Aussage hinsichtlich der Gesamtentwicklung des Systems zu treffen.

Um eine plausible Prognose herzustellen, qualifiziert die Methode folgend unterschiedliche mathematische, systemtheoretische und hybride Prognoseverfahren. Aus dem Bereich der mathematischen Prognoseverfahren werden verschiedene Grau-Modelle (Grey Systems Theory nach [Deng 1982]) angewendet. Es zeigt sich, dass die Modelltypen $GM(1,n>1)$ und $GM(2,n)$ nicht prognosefähig sind. Die Modelle $GM(1,1)$ und $MGM(1,n)$ zeigen gute Erwartungswerte der Verkehrssicherheitsprognose. Gleichzeitig kann gezeigt werden, dass die Grau-Modelle nicht mit schwankenden Zeitreihen sowie mehr als drei Zeitreihen als Eingangsgrößen umgehen können. Neuronale Netze erfordern zur Prognose von Zeitreihen sog. Prädiktorvariablen, welche das erwartete Verhalten des zu prognostizierenden Systems bereits in der Zukunft beschreiben. Aus diesem Grund und der Problematik der nicht-deterministischen Natur können neuronale Netze in ihrer vereinfachten Form auch ausgeschlossen werden. Aus dem Bereich der systemtheoretischen Prognoseverfahren wird die Methode System Dynamics angewendet. Es kann exemplarisch gezeigt werden, dass dieser Ansatz in der Lage ist, die Fragestellung der Arbeit zu beantworten. Es wird sich gegen die Methode entschieden, weil erwartet wird, dass nicht alle kausalen Zusammenhänge begründbar zu modellieren sind. Daraufhin werden hybride Verfahren exemplarisch angewendet: Aus dem Bereich der mathematischen Verfahren werden Backpropagations-Netze mittels genetischer Algorithmen trainiert, dies führt zu sehr guten Prognoseergebnissen, löst aber nicht die Problematik der Prädiktorvariablen. Ebenfalls wird die Methode System Dynamics mit einem Grau-Modell kombiniert, um so die Problematik der Unsicherheiten der kausalen Zusammenhänge direkt an das Modell zu geben. Das entwickelte hybride Modell zeigt eine plausible Antwort. Die Qualifizierung der Prognoseverfahren kommt zu dem Schluss, den hybriden Ansatz aus neuronalen Netzen und genetischen Algorithmen zu nutzen. Das Problem der Prognose der Prädiktorvariablen wird durch eine weitere Hybridisierung mit einem Grau-Modell gelöst.

Die Methode wird exemplarisch angewendet und betrachtet ausgewählte Maßnahmen der Verkehrsmittel. Aufgrund einer mangelnden Datenbasis können keine Maßnahmen der übrigen Verkehrskonstituenten eingebunden werden. Zu den aktiven und passiven Maßnahmen, deren Wirkung im Verkehrssystem prognostiziert wird, gehören der automatische Abstandsregelautomat, der Aufmerksamkeitsassistent, die aufstellbare Fronthaube, der Einparkassistent, die elektronische Stabilitätskontrolle, Front- und Kopfairbags, das Gurtwarnsystem, der Nachtsichtassistent, der Notbremsassistent, das Reifendruckkontrollsystem sowie das Tagfahrlicht und der Totwinkel-Assistent. Die Ergebnisse der Prognose treffen Erwartungswerte für das Aufkommen von tödlich Verunglückten in verschiedenen Infrastrukturumgebungen, an Verkehrsmodenübergängen, zu unterschiedlichen Witterungsbedingungen sowie spezifische Ursachen (z. B. Übermüdung). Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich die Verkehrssicherheit in allen Bereichen mindestens verbessert. Die Prognose für die Jahre zwischen 2016 und 2026 zeigt, dass das Aufkommen von Getöteten um ca. 50% reduziert werden kann. Das anteilige Unfallaufkommen wird sich von innerörtlich Getöteten hin zu mehr Getöteten auf Autobahnen und außerorts verlagern.

Es lassen sich drei Handlungsschwerpunkte für Entscheidungsträger feststellen: Für die Entwicklung der Getöteten im Baustellenbereich wird seitens des Prognosemodells eine Stagnation erwartet. Hier werden innerhalb der kommenden zehn Jahre keine Verbesserungen eintreten. Die im Baustellenbereich verorteten Maßnahmen scheinen hier keinen Effekt hervorzurufen.

Hinsichtlich witterungsspezifischer Unfälle wird ermittelt, dass das Wirkfeld der Getöteten bei Nebel nicht reduziert werden kann. Dieses Wirkfeld stellt gleichzeitig nominell eine sehr kleine Gruppe der Getöteten dar. Für ursachenspezifische Wirkfelder kann vom Prognosemodell bestimmt werden, dass bis 2026 das Unfallaufkommen mit Getöteten durch Alkoholeinfluss ebenfalls nicht verbessert werden kann.

Literaturverzeichnis

- [Abendroth u. Bruder 2012] Abendroth, B., Bruder, R., 2012. Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl., S. 4–14. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- [acatech 2015] acatech, 2015. Neue autoMobilität – Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft, acatech POSITION, September 2019, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München.
- [Ahmadizar 2015] Ahmadizar, F., Soltanian, K., AkhlaghianTab, F., & Tsoulos, I., 2015. Artificial neural network development by means of a novel combination of grammatical evolution and genetic algorithm. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 39, 1–13.
- [Ahrens et.al. 2011] Ahrens, A., Baum, H., Beckmann, K. J., Boltze, M., Eisenkopf, A., Göpfert, I., Hirschhausen, C. von, Knieps, G., Knorr, A., Mitusch, K., Oeter, S., Radermacher, F.-J., Schindler, V., Siegmann, J., Schlag, B., Stolzle, W., 2011. Sicherheit zuerst: Möglichkeiten zur Erhöhung der Straßenverkehrssicherheit in Deutschland. Teil 1 und 2. Straßenverkehrstechnik 2011 (2-3), 76–90.
- [Aioki et.al. 2009] Aoki, H., Aga, M., Miichi, Y., & Matsuo, Y., 2009. Development of a safety impact estimation tool for advanced safety technologies. In: 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV 2009), No. 09–0025.
- [Alicke 2003] Alicke, K., 2003. Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken. Unternehmensübergreifendes Supply Chain Management, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Alvin et.al. 1998] Alvin, K. F., Oberkamp, W. L., Diegert, K. V., Rutherford, B. M., 1998. Uncertainty quantification in computational structural dynamics: A new paradigm for model validation. In: Proceedings of the XVIth IMAC, Santa Barbara.
- [Amalberti 2001] Amalberti, R., 2001. The paradoxes of almost totally safe transportation systems. Safety Science 37 (2-3), 109–126. 10.1016/S0925-7535(00)00045-X.
- [Ammoser u. Hoppe 2006] Ammoser, H., Hoppe, M., 2016. Glossar Verkehrswesen – Definitionen und Erläuterungen zu den Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens, Technische Universität Dresden, Dresden.
- [Appel et. al. 2005] Appel, H., Krabbel, G., Vetter, D., 2005. Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion, 2nd ed. Vieweg, Wiesbaden, 215 pp.
- [Armstrong et.al. 2015] Armstrong, J. S., Green, K. C., Graefe, A., 2015. Golden Rule of Forecasting: Be conservative. Journal of Business Research 68, 1717–1731.
- [Assing et.al. 2010] Assing, K., Höhnscheid, K.-J., Kranz, T., Schönebeck, S., 2010. Straßenverkehrssicherheit als wichtige Voraussetzung für nachhaltige Mobilität. Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 79 (2), 61–76.
- [Audi 2017] Audi, 2017. Audi A8 – Audi AI Staupilot, In: <https://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/fahrerassistenzsysteme/audi-a8-audi-ai-staupilot>.

- [Babkin et.al. 2015] Babkin, A. V., Karlina, E. P., Epifanova, N. S., 2015. Neural Network as a tool of forecasting of socioeconomic systems strategic development. *Social and Behavioral Science* 207, 274–279.
- [Bach 2016] Bach, M., 2016. Autonomes Fahren und gesetzliche Grundlagen, In: *Automobile Systeme in der Automatisierung*, Zöbel, D. (Hrsg.), Universität Koblenz-Landau, FB Informatik.
- [Bähr 2011] Bähr, Jürgen: Einführung für die Urbanisierung, 2011.
- [Bainbridge 1983] Bainbridge, L., 1983. Ironies of Automation. *Automatica* 19 (6), 775–779.
- [Bakker u. Hermann 2001] Bakker, J., & Herrmann, R. (2001). Systematik zur Ermittlung der Wirksamkeit von Fahrzeug-Sicherheitsmaßnahmen auf der Grundlage von deutschen Unfalldatenbanken. In: *Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz: Tagung Berlin*, 6.–7. September 2001 (Düsseldorf, 2001), No. 1637 in VDI-Berichte, VDI Verlag.
- [Ball 2011] Ball, M., 2011. Energy Institute Framework for Process Safety Management. *Process Safety* 2010. Energy Institute, London.
- [Bartl u. Hager 2006] Bartl, G., Hager, B., 2006. Unfallursachenanalyse bei PKW-Lenkern: Ein Forschungsprojekt in Kooperation mit der Bundesanstalt für Verkehr. Institut Gute Fahrt, Wien.
- [Baum u. Haussler 1989] Baum, E. B., Haussler, D.: What size net gives valid generalization? *Neural Computation*, 1989, 1(1): 151–160.
- [Beisel et.al. 2013] Beisel, D., Hosse, R. S., Schnieder, E.. 2013. Modellbasierte Analyse der Auslegung moderner Fahrerassistenzsysteme. *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*. (1), 74–81.
- [Belew u. Booker 1991] Belew, R. K., Booker, L. B., 1991. *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc, Mateo, CA.
- [Bertalanffy 1973] Bertalanffy, Ludwig von (1973, c1968). *General system theory. Foundations, development, applications*. Rev. ed. New York: G. Braziller.
- [Bertalanffy 1984] Bertalanffy, Ludwig von, 1984. Vorläufer und Begründer der Systemtheorie. In: Kaplan, M. A.; Bertalanffy, L. v. (Hrsg.): *Systemtheorie*, 2., unveränd. Aufl., 17–28. Colloquium Verl., Berlin. (Forschung und Information, 12).
- [Bertin 2010] Bertin-Jones, M., 2010. Applying systems methodology to the road safety challenge. *Traffic Engineering and Control* 7 (1), 28–30.
- [Bertsche u. Lechner 2006] Bertsche, B., Lechner, G, 2006. *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*, Springer, Berlin.
- [BGH 2009] Bundesgerichtshof, 2009. Zur Haftung eines Fahrzeugherstellers für die Fehlauslösung von Airbags. Urteil vom 16. 6. 2009 – VI ZR 107/08; OLG Jena.
- [Bird u. Germain 1966] Bird, F., Germain, G., 1966. *Damage Control, A New Horizon in Accident Prevention and Cost Improvement*. American Management Association. The Comet Press.
- [Black et.al. 2011] Black, D. D., Hull, M. E. C., et al., 2011. Systems engineering and safety – a framework. *IET Softw.* 5(1), 43–53.

- [Blake 1963] Blake, R. P., 1963. Industrial Safety. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [Blotevogel 2001] Blotevogel, V., 2001. Die Stadt als Fokus gesellschaftlicher Veränderung In: Suburbanisierung-Desurbanisierung-Reurbanisierung, Universität Duisburg, Duisburg.
- [Bock 2016] Bock, D., 2016. Wiederholungs- und Vertiefungskurs Strafrecht: Besonderer Teil – Nichtvermögensdelikte, Springer, Berlin.
- [Bode et.al. 2009] Bode, W., Deutler, S., Weßling, F., Fennhoff, K., Grottendieck, C., 2009. Verkehrsuntersuchung in der Gemeinde Bohmte unter besonderer Berücksichtigung der Wirkungen des Shared Spaces. LOGIS.NET, Osnabrück.
- [Bolderdijk et. al. 2011] Bolderdijk, J.W., Knockaert, J., Stega, E. M., Verhoef, T., 2011. Effects of Pay-As-You-Drive vehicle insurance on young drivers' speed choice: Results of a Dutch field experiment, Accident Analysis & Prevention, 43(3), pp. 1181–1186.
- [Booth 1980] Booth, W. L., 1980. Police Management of Traffic Accident Prevention Programs. Charles C. Thomas, Springfield.
- [Bordoff u. Noel 2008] Bordoff, Jason E., Noel, Pascal J., 2008. Pay-As-You-Drive Auto Insurance. A simple way to reduce driving-related harms and increase equity, Massachusetts.
- [Bossel 2004] Bossel, H., 2004. Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Books on Demand, Norderstedt.
- [Bothe 1998] Bothe, H.-H.: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen, Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [Bouyssou et.al. 2009] Bouyssou, D., Dubois, D., Prade, H., Pirlot, M., 2009. Decision Making Process: Concepts and Methods. Wiley, Weinheim.
- [Boysen 2011] Boysen, W., 2011. Kybernetisches Denken und Handeln in der Unternehmenspraxis: Komplexes Systemverhalten besser verstehen und gezielt beeinflussen. 1. Auflage, Springer, Wiesbaden.
- [Brandenstein 2011] Brandenstein, K., 2011. Kommunikation zwischen Straße und Fahrzeug verspricht keine großen Potenziale. GDV. <http://www.gdv.de/2011/12/kommunikation-zwischen-strasse-und-fahrzeug-verspricht-keine-grossen-potenziale/>.
- [Bratzel 2014] Bratzel, S., 2014. Die junge Generation und das Automobil – Neue Kundenanforderungen an das Auto der Zukunft? In: Ebel, B.; Hofer, M. B.(Hrsg.): Automotive Management, 93–108. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Breuer 2002] Breuer, J., 2002. Objektive Bewertung der Aktiven Sicherheit von Fahrzeugen: Kritische Betrachtung. In: VDA Technischer Kongreß 2002 – Sicherheit durch Elektronik (Frankfurt a. Main, 2002) (pp. 105–113). VDA – Verband der Automobilindustrie.
- [Brock et.al. 2007] Brock, D., Junge, M., Krähnke, U. 2007. Soziologische Theorien von Auguste Comte bis Talcott Parsons. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- [Brockmann 2015] Brockmann, S, 2015. Altes Autos – junge Fahrer. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

- [Brockschnieder 2014] Brockschnieder, C., 2014. System Dynamics Modellierung der Entwicklung Getöteter im Straßenverkehr. Betreuer: René S. Hosse, Technische Universität Braunschweig, Projektarbeit.
- [Brüde 1995] Brüde, U., 1995. What is happening to the number of fatalities in road accidents?: A model for forecasts and continuous monitoring of development up to the year 2000. *Accident Analysis & Prevention* 27 (3), 405–410. 10.1016/0001-4575(94)00062-Q.
- [Buckley 1968] Buckley, W., 1968. Society as a complex adaptive system. In: Buckley, W. (Ed.): *Modern systems research for the behavioral scientist*. Chicago: Aldine 1968, pp. 490–513.
- [Burns u. Machado 2009] Burns, T. R., Machado, N., 2009. Technology, complexity, and risk: social systems analysis of risky socio-technical systems and the likelihood of accidents. *Sociologia, Problemas e Práticas*(61),11–39.
- [Busch 2005] Busch, S., 2005. Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme. In: *Fortschritts-Berichte VDI*, No. 588 in 12. VDI Verlag, Düsseldorf.
- [Busch et.al. 2013] Busch, R., Dögl, R., Unger, R., 2013. *Integriertes Marketing: Strategie, Organisation, Instrumente*, Springer, Berlin.
- [Büttner et.al. 2007] Büttner, T., Fahlbruch, B., Wilpert, B., 2007. *Sicherheitskultur: Konzepte und Analysemethoden*, 2nd ed. Asanger, Heidelberg, 156 pp.
- [Buxhoeveden u. Becker 2016] von Buxhoeveden, G., Becker, U., 2016. Comparison of Traffic Incident Data in Individual and Public Transport. *ICSAI 2016, IEEE – 3rd International Conference on Systems and Informatics*, Shanghai, China, November 2016.
- [Callan 2003] Callan, R., 2003. *Neuronale Netze im Klartext*, Pearson Studium, München.
- [Camelia 2015] Camelia, D., 2015. Grey Systems Theory in economics: A historical applications review. *Grey Systems: Theory & Appl* 5 (2), 263–276.
- [Cameron 1992] Cameron, M., 1992. *Accident Data Analysis to Develop Target Groups for Countermeasures*. Monash University Accident Research Centre, Melbourne.
- [Chase 2009] Chase, B., Mosqueda, J., 2009. *Still Unsafe at any Speed: Auto Defects that Cause wrongful Deaths and catastrophic Injuries*. Equalizer Books, Newport Beach, 253 pp.
- [Chen u. Ting 2002] Chen, C.-N., Ting, S.-C., 2002. A study using the grey system theory to evaluate the importance of various service quality factors. In: *International Journal of Quality & Reliability Management*, 19 (2002), Heft 7, 838–861.
- [Chestnut 1973] Chestnut, H., 1973. *Methoden der System-Entwicklung*. Hanser, München.
- [Childers u. Rohrer 1992] Childers, A. B., Rohrer, S. L., 1992. A new food safety strategy for tropical America. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 653, 376–379.
- [Daenzer 1988] Daenzer, W. F., 1988. *Systems Engineering: Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben*, 6th ed. Verlag industrielle Organisation, Zürich.

- [Davis et.al. 2014] Davis, M. C., Challenger, R., Jayewardene, D. N. W., Clegg, C. W., 2014. Advancing socio-technical systems thinking: A call for bravery. *Applied Ergonomics* 45 (2), 171–180. 10.1016/j.apergo.2013.02.009.
- [Dekker et.al. 2011] Dekker, S., Cilliers, P., Hofmeyr, J.-H., 2011. The complexity of failure: Implications of complexity theory for safety investigations. *Safety Science* 49 (6), 939–945. 10.1016/j.ssci.2011.01.008.
- [Delcea Camelia et al. 2015] Delcea C., Rathnayaka, R., Kapila Tharanga, M., Seneviratna, D. M. K. N., Jianguo, W., 2015. Grey system based novel approach for stock market fore-casting. In: *Grey Systems: Theory and Application*, 5 (2015), Heft 2, 178–193.
- [Delorme u. Lassarre 2014] Delorme, R., Lassarre, S., 2014. A new theory of complexity for safety research: The case of the long-lasting gap in road safety outcomes between France and Great Britain. *Safety Science* 70, 488–503. 10.1016/j.ssci.2014.06.015.
- [Deng 1989] Deng, J., 1989. Introduction to Grey Systems Theory. *The Journal of Grey Systems* 1, 1–24.
- [Der Spiegel 1971] Der Spiegel, 1971. Sicherheitsautos: Für Tage ohne Tote, Hamburg.
- [destatis 2018] destatis, 2018. Unfallentwicklung auf deutschen Straßen, 2017, Berlin.
- [DGUV 2011] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Verkehrssicherheit. <http://www.dguv.de/inhalt/praevention/themen_a_z/verkehr_sicher/index.jsp>.
- [Die Zeit 2018] Die Zeit, 2018. Selbst Kinder können sich ein autonomes Auto rufen. In: <http://www.zeit.de/mobilitaet/2018-01/johann-jungwirth-volkswagen-digitalchef-autonome-autos>.
- [Dien et.al. 2012] Dien, Y., Dechy, N., Guillaume, E., 2012. Accident investigation: From searching direct causes to finding in-depth causes: Problem of analysis or/and of analyst? *Safety Science* 50 (6), 1398–1407. 10.1016/j.ssci.2011.12.010.
- [Diez 2006] Diez, W., 2009. Automobil-Marketing: Navigationssystem für neue Absatzstrategien. MI Wirtschaftsbuch.
- [Doebling 2002] Doebling, S. W.: Structural dynamics model validation: Pushing the envelope. In: *International Conference on Structural Dynamics Modeling: Test, Analysis, Correlation and Validation*, 2002, 3–5.
- [Dommel 2005] Dommel, L.: Grundkurs Europäische Verkehrspolitik. Basics eines Politikfeldes zu Wasser, zu Lande und in der Luft, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2005.
- [Dörner 2009] Dörner, D., 2009. Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen, 8th ed. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 346 pp.
- [Drewes 2009] Drewes, J., 2009. Verkehrssicherheit im systemischen Kontext. Dissertation, Braunschweig.
- [Durkheim u. Luhmann 1988] Durkheim, É. Luhmann, N., 1988. Über soziale Arbeitsteilung. Studie über die Organisation höherer Gesellschaften. Mit e. Einl. Arbeitsteilung und Moral : Durkheims Theorie / von Niklas Luhmann [u.a.]. 2. Aufl. Suhrkamp, Frankfurt am Main.
- [DVR 2006] DVR, 2006. Fahrerassistenzsysteme – Innovationen im Dienste der Sicherheit. 12. DVR-Forum Sicherheit und Mobilität München, 21.09.2006.

- [DVR 2010] DVR, 2010. Verkehrssicherheit 2020: Eckpunktepapier. Deutscher Verkehrssicherheitsrat, Bonn.
- [ECE R79] ECE R79: Regelung Nr. 79 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage. Addendum 78: Regelung Nr. 79, Revision 2.
- [Eenik et.al. 2005] Eenik, R., Reurings, M., Elvik, R., Cardoso, J., Wichert, S., Stefan, C., 2005. Accident Prediction Models and Road Safety Impact Assessment: Recommendations for using these tools. RIPCORDER.
- [Ehrlenspiel 2009] Ehrlenspiel, K., 2009. Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 4., aktualisierte Aufl., Hanser, München.
- [Eisenbach 2005] Eisenbach, D., 2005. Künstliche neuronale Netze zur Prognose von Zeitreihen. Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster.
- [El-Basyouny u. Sayed 2009] El-Basyouny, K., Sayed, T., 2009. Accident prediction models with random corridor parameters. *Accident Analysis & Prevention* 41, 1118–1123.
- [Elvik 2014] Elvik, R., 2014. Problems in determining the optimal use of road safety measures. *Research in Transportation Economics* 47, 27–36. 10.1016/j.retrec.2014.09.016.
- [Elvik et.al. 2009] Elvik, R., Vaa, T., Høy, A., Sørensen, M., 2009. The handbook of road safety measures. Elsevier, Amsterdam, xii, 1078.
- [Embrey 1992] Embrey, D. E., 1992. Incorporating management and organisational factors into probabilistic safety assessment. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 38(1–2), 199–208.
- [Ethik-Kommission 2017] Ethik Kommission, 2017. Bericht zum automatisierten und vernetzten Fahren, BMVBS, Berlin.
- [EU 2016] Europäische Union, 2016. Road Safety 2016 – How is your country doing. In: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/score-board_2016_en.pdf.
- [Fach u. Ockel 2009] Fach, M., Ockel, D., 2009. Evaluation methods for the effectiveness of active safety systems with respect to real world accident analysis. In: 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV 2009), No. 09–0311.
- [Facijs 2010] Facijs, T., 2010. Moderne Assistenzsysteme in der Fahrausbildung. Studienarbeit, Braunschweig.
- [Färber 2006] Färber, B., 2006. (Un)sichtbare Beifahrer. Was Autofahrer von Fahrerassistenzsystemen erwarten (können). In: Fahrerassistenzsysteme. Im Dienste der Sicherheit, 6–13, Bonn.
- [Fastenmeier et.al. 2001] Fastenmeier, W., Gstalter, H., Zahn, P. (2001). Prospektive Risikopotentialabschätzung am Beispiel der Spurwechsel-Assistenz. In: Der Fahrer im 21. Jahrhundert (Düsseldorf, 2001), No. 1613 in VDI-Berichte, VDI .
- [Fell 1976] Fell, J. C., 1976. A motor vehicle accident causal system: the human element. *Hum. Factors* 18(1), 85–94.
- [Fildes u. Petropoulos 2015] Fildes, R., Petropoulos, F., 2015. Is there a Golden Rule? *Journal of Business Research* 68, 1742–1745.

- [Ford 1999] Ford, A., 1999. Modeling the Environment. Island Press, Washington.
- [Forrester 1968] Forrester, J. W., 1968. Principles of systems: Text and workbook, 2nd ed. Wright-Allen Pr, Cambridge Mass.
- [Forrester 1969] Forrester, J. W., 1969. Urban dynamics. M. I. T. Pr, Cambridge Mass.
- [Forrester 1994] Forrester, J. W., 1994. System dynamics, systems thinking, and soft OR. System Dynamics Review 10 (2-3), 245–256. 10.1002/sdr.4260100211.
- [Forrester 1994] Forrester, J. W., 1994. Learning through system dynamics as preparation for the 21st century: Keynote address for Systems Thinking and Dynamics Modeling Conference for K-12 education at Concord Academy. Concord.
- [Forrester u. Senge 1980] Forrester, J. W.; Senge, P. M., 1980. Tests for Building Confidence in System Dynamics Models. Amsterdam (u. a.). In: Legasto, A. A. et al.: System Dynamics. 209 – 228.
- [Frank 1994] Frank, P. M., 1994. Diagnoseverfahren in der Automatisierungstechnik. at -Automatisierungstechnik, 42, 1994, 2, 47 - 64.
- [Freymann 2003] Freymann, R., 2003. Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen. http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/01_frey mann.pdf.
- [Fuller u. Santos 2002] Fuller, R., Santos, J. A., 2002. Human factors for highway engineers, 1st ed. Pergamon, Amsterdam, 325 pp.
- [Gabler 2017] Gabler Wirtschaftslexikon, 2017: Begriff Testmarkt. In: www.gabler-wirtschaftslexikon.de
- [GDV 2011] GDV, 2011. Jahresbericht 2011: Die Unfallforschung der Versicherer.
- [GDV 2016] GDV, 2016. Unfalltypen-Katalog: Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps, Berlin.
- [Gerig 2006] Gerig, V., 2006. Parameterschätzung stochastischer Prozesse aus der Finanzwelt mittels (Dünngitter-)Histogramm-Matching-Verfahren. Diplomarbeit, Köln.
- [Gerlach et.al. 2007] Gerlach, J., Methorst, R., Boenke, D., Leven, J., 2007. Sinn und Unsinn von Shared Spaces: Zur Versachlichung einer populären Gestaltungsphilosophie. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- [Gibson 1961] Gibson, J. J., 1961. The Contribution of Experimental Psychology to the Formulation of the Problem of Safety – A Brief for Basic Research. Behavioural Approaches to Accident Research. Assoc. for the Aid of Crippled Children, NewY ork, 77–89.
- [GIZ 2015] GIZ, 2015. A comprehensive approach for road safety: The example Germany, Berlin.
- [Glass et.al. 1979] Glass, H. H., McHugh, M. H., et al., 1979. The Liability of Employers in Damages for Personal Injury. Law Book Co., Sydney.
- [Glendon u. Waring 1997] Glendon, I., Waring, A., 1997. Risk management as a framework for occupational health and safety. J. Occup. Health Saf. Aust. N. Z. 13(6), 525–532.

- [Goh et. al. 2012] Goh, Y. M., Love, P. E. D., 2012. Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy. *Safety Science* 50 (7), 1594–1605. 10.1016/j.ssci.2012.03.002.
- [Gomez 1993] Gomez, P., 1993. Wertmanagement: vernetzte Strategie für Unternehmen im Wandel. ECON, Düsseldorf (u. a.).
- [Goode u. Machol 1957] Goode, H., Machol, R., 1957. *System Engineering. An Introduction to the Design of large-scale Systems*. New York: McGraw-Hill.
- [Gordon 1949] Gordon, J. E., 1949. The epidemiology of accidents. *Am. J. Public Health* 39, 504–515.
- [Grey et.al. 1987] Grey, S. M., Norris, B. J., et al., 1987. *Ergonomics in the Electronic Retail Environment*. ICL (UK) Ltd, Slough, UK.
- [Grigoryev 2015] Grigoryev, I., 2015. *AnyLogic 7 in Three Days: A Quick Course in Simulation Modeling*, Ilya Grigoryev.
- [Gründl 2005] Gründl, M., 2005. Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotential und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, Regensburg.
- [Gründl 2006] Gründl, M., 2006. Analyse des Fahrerverhaltens vor dem Unfall: Eine Methode für eine verbesserte Fehleranalyse bei der Untersuchung realer Verkehrsunfälle. Positionspapier, Regensburg.
- [Grune 2016] Grune, L., 2016. Katalogisierung und Evaluation von Straßenverkehrssicherheitsmaßnahmen, Bachelorarbeit, Technische Universität Braunschweig.
- [Grünheid u. Fiedler 2013] Grünheid, E., Fiedler, C., 2013. Bevölkerungsentwicklung 2013. Daten, Fakten, Trends zum demografischen Wandel, https://www.bib.bund.de/Publikation/2013/pdf/Bevoelkerungsentwicklung-2013-Daten-Fakten-Trends-zum-demografischen-Wandel.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- [Haar 2011] Haar, S., 2011. Analyse und Prognose von Trainingswirkungen multivariater Zeitreihenanalysen mit künstlichen neuronalen Netzen. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [Haas et.al. 1991] Haas, I., Pfafferoth, I., Schulze, H., 1991. Verkehrsteilnehmer und Verkehrsteilnehmerinnen im vereinten Deutschland: Befragungsergebnisse im Ost-/Westvergleich 1990/91, Wirtschaftsverl. NW, Wiesbaden.
- [Haddon 1980] Haddon, W., 1980. Options for the prevention of motor vehicle crash injury. *Isr. J. Med. Sci.* 16(1), 45–65.
- [Hai 2015] Hai, N.P., 2015. Taylor Approximation Method in Grey Prediction and its Applications in Educational Information and Measurement. Dissertation, Taichung.
- [Hannwald 2008] Hannawald, L., 2008. Multivariate Bewertung zukünftiger Fahrzeugsicherheit. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- [Hanson 1999] Hanson, K. M., 1999. A framework for assessing uncertainties in simulation predictions. *Physica D* 133 (1999), 179–188.
- [Hauer 2010] Hauer, E., 2010. On prediction in road safety. *Safety Science* 48 (9), 1111–1122. 10.1016/j.ssci.2010.03.003.

- [Heinrich 1931] Heinrich, H. W. 1931. Industrial accident prevention: a scientific approach. New York: McGraw-Hill
- [Heinrich et.al. 1980] Heinrich, H. W., Petersen, D., et al., 1980. Industrial Accident Prevention. McGraw-Hill, New York.
- [Helling 2011] Helling, N., 2011. Lehrinhalte der Fahrausbildung der Führerscheinklasse B unter sicherheitsrelevanten Gesichtspunkten. Bachelorarbeit. Technische Universität Braunschweig.
- [Helmer u. Rescher 1959] Helmer, O., Rescher, N., 1959: On the Epistemology of Inexact Sciences. In: Management Science 5 (1959), 25–52.
- [Hempel u. Oppenheim 1948] Hempel, C. G., Oppenheim, P., 1948: Studies in the Logic of Explanation. In: Philosophy of Science 15 (1948), 135–175.
- [Herweg 2015] Herweg, N., 2015. Multiple Streams Ansatz. In: Wenzelburger, G., Zohlhöfer, R. (Hrsg.) Handbuch Policy-Forschung. Springer VS, Wiesbaden.
- [Hewett et al. 1992] Hewett; Becker; Card; Carey; Gasen; Mantei; Perlman; Strong; Verplank, 1992. Curricula for Human-Computer Interaction.
- [Hilse u. Schneider 1995] Hilse, H. G., Schneider, W., 1995. Verkehrssicherheit: Handbuch zur Entwicklung von Konzepten, Gebundene Ausgabe, Boorbergö.
- [Hirasawa et.al. 2005] Hirasawa, M., Asano, M., et al., 2005. Study on design in introduction of a road safety management system as a new road safety policy. In: 6th Conference of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Bangkok, Thailand.
- [Holling u. Gediga 2013] Holling, H. Gediga, G., 2013. Statistik – Wahrscheinlichkeitstheorie und Schätzverfahren, 1. Aufl., Hogrefe, Göttingen.
- [Hollnagel 2006] Hollnagel, E., 2006. Resilience engineering: Concepts and precepts. Ashgate, Aldershot.
- [Hollnagel 2006] Mohaghegh, Z., Mosleh, A., 2009. Incorporating organizational factors into probabilistic risk assessment of complex socio-technical systems: Principles and theoretical foundations. Safety Science 47 (8), 1139–1158. 10.1016/j.ssci.2008.12.008.
- [Holló et.al. 2010] Holló, P., Vojtech, E., et al., 2010. Road safety performance indicators and their explanatory value: a critical view based on the experience of Central European countries. Saf.Sci. 48, 1142–1150.
- [Hornik et.al. 1989] Hornik, K. M., Stinchcombe, M., White, H., 1989. Multilayer feed-forward networks universal approximators, Neural Networks, 2(2) (1989), 359–366.
- [Hosse 2011] Hosse, R. S., 2011. Regelkreise der Verkehrssicherheit, Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig.
- [Hosse et.al. 2012] Hosse, R. S.; Sikatzki, S.; Schnieder, E.; Bandelow, N., 2012. Increasing Systems-Safety by Meliorating Policy-Processes under Conditions of Ambiguity. Analyzing Interdisciplinary Ascendancies of the German Traffic System by Using Cybernetic Hazard Analyzing Methodologies. ICEME 2012 – The 3rd International Conference on Engineering and Meta-Engineering, Orlando, Florida, USA.

- [Hosse et.al. 2013] Hosse, R. S., Sikatzki, S. S., Schnieder, E., Bandelow, N. C., 2013. Understanding Policy Processes by Engineering Principles of Systems Theory. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*. 11(2), 65–72.
- [Hosse et.al. 2017] Hosse, R. S., Bagschik, G., Maurer, M., Becker, U., Bengler, K., 2017. Evolution Issues of Automated Driving Functions by Application of Systemic Accident Analysis on the Example of the Tesla Model S Fatality. In: Massachusetts Institute of Technology (Hrsg.): *Proceedings of the STAMP Workshop 2017*, Chambridge, USA, March 2017. STAMP Workshop 2017.
- [Huang 2015] Huang, H. X., Li, J. C., & Xiao, C. L. (2015). A proposed iteration optimization approach integrating backpropagation neural network with genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 42(1), 146–155.
- [Hughes et.al. 2015] Hughes, B. P., Newstead, S., Anund, A., Shu, C. C., Falkmer, T., 2015. A review of models relevant to road safety. *Accident Analysis & Prevention* 74, 250–270. 10.1016/j.aap.2014.06.003.
- [Hui et.al. 2013] Hui, H., Li, F., Shi, Y., 2013. An optimal multi-varibale grey model for logistics demand forecast. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 9 (7), 2907–2918.
- [Isermann 1994] Isermann, R., 1994. Überwachung und Fehlerdiagnose – Moderne Methoden und ihre Anwendung bei technischen Systemen. VDI, Düsseldorf.
- [ISO/SAE AWI 21434] ISO, 2018. Road Vehicles – Cybersecurity engineering, ISO/SAE AWI 21434.
- [ISO/WD PAS 21448] ISO, 2018. Road vehicles – Safety of the intended functionality, ISO/WD PAS 21448.
- [ISO26262] ISO, 2011. Functional Safety – Road Vehicles, ISO26262:2011.
- [Jackson 2003] Jackson, M. C., 2003. *Systems thinking: Creative holism for managers*. Wiley, Chichester, 352 pp.
- [Johnson 1980] Johnson, W. G., 1980. *MORT Safety Assurance Systems*. National Safety Council and Marcel Dekker Inc.
- [Judd 1987] Judd, J. S., 1987. Learning in networks is hard. *Proceedings of the 1st IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks*, 2 (1987), 685–692.
- [Kapmeier 2003] Kapmeier, F., 2003. *Vom systemischen Denken zur Methode System Dynamics*. Diplomarbeit, Stuttgart.
- [Karnopp et al. 1990] Karnopp, D. C. et al., 1990- *System dynamics: a unified approach*. 2. Auflage, New York, Chichester (u. a.).
- [Kayacan et.al. 2010] Kayacan, E., Ulutas, B., Kaynak, O., 2010. Grey system theory-based models in time series prediction. *Expert Systems with Applications* 37 (2), 1784–1789. 10.1016/j.eswa.2009.07.064.
- [Kieckhäfer 2013] Kieckhäfer, K., 2013. *Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [Kingdon 1984] Kingdon, J. W., 1984. *Agendas, Alternatives and Public Policies*. Little, Brown and Company, Boston.

- [Knapp 1978] Knapp, H. G., 1978. Logik der Prognose. Semantische Grundlegung technologischer und sozialwissenschaftlicher Vorhersagen, Alber, Freiburg, München .
- [Kohsiek et.al. 2011] Kohsiek, A., Zatloukal, M., Wille, J. M., 2011. Entwicklung eines Werkzeugs zur Effizienzbewertung aktiver Sicherheitssysteme. In: Grazer SafetyUpdate 2011.
- [Krämer 1999] Krämer, W. 1999. Statistik verstehen. Eine Gebrauchsanweisung, 4. Aufl., Campus, Frankfurt am Main.
- [Kreis u. Neuhaus 2006] Kreis, J.-P., Neuhaus, G., 2006. Einführung in die Zeitreihenanalyse. Springer, Berlin.
- [Kreiss et.al. 2011] Kreiss, J.-P., Stanzel, M., & Zobel, R. (2011). On the use of real-world accident data for assessing the effectiveness of automotive safety features –Methodology, timeline and reliability. In 22st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV 2011), no. 11–0054.
- [Krems u. Vollrath 2011] Krems, J. F., Vollrath, M., 2011. Verkehrspsychologie: Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker, Kohlhammer, Stuttgart.
- [Kruse 2015] Kruse, R., 2015. Computational intelligence: Eine methodische Einführung in künstliche neuronale Netze, evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze, 2nd ed. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [Kuder 2005] Kuder, M., 2005. Kundengruppen und Produktlebenszyklus. Dynamische Zielgruppenbildung am Beispiel der Automobilindustrie. Univ., Diss., Chemnitz, 2004., 1. Aufl., Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden.
- [Kutylowska 2015] Kutylowska, M., 2015. Neural network approach for failure rate prediction. Engineering failure analysis 47, 41–48.
- [Larsson et.al. 2010] Larsson, P., Dekker, S. W. A., Tingvall, C., 2010. The need for a systems theory approach to road safety. Safety Science 48 (9), 1167–1174. 10.1016/j.ssci.2009.10.006.
- [Lauterwasser 2016] Lauterwasser, C., 2016. Vom teilautomatisierten Fahren zum autonomen Fahren: Perspektive und Rolle der Versicherung, es: Rück, Hannover.
- [Leiner 2004] Leiner, B., 2004. Einführung in die Statistik, 9. Aufl., 9., unwes. veränd. Aufl. Reprint 2014, De Gruyter Oldenbourg, München.
- [Lenemann et.al. 2008] Leneman, F., Verburg, D., Hair-Buijssen, S. D., 2008. PreScan, testing and developing active safety applications through simulation. In: 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz.
- [Leohold 2011] Leohold, J. 2011. Highly automated driving: fiction of future? HAVEit Final Event, Borås, Sweden.
- [Lerner et.al. 2014] Lerner, M., Schepers, A., Pöppel-Decker, M., Leipnitz, C., Fitschen, A., 2014. Voraussichtliche Entwicklung von Unfallzahlen und Jahresfahrleistungen in Deutschland: Ergebnisse 2014. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- [Leung et.al. 2003] Leung, F. H., Lam, H. K., Ling, S. H., Tam, P. K., 2003. Tuning of the structure and parameters of a neural network using an improved genetic algorithm. Neural Networks, IEEE Transactions on, 14(1), 79–88.

- [Leveson 2004] Leveson, N. G., 2004. A systems-theoretic approach to safety in software-intensive systems. *IEEE Trans.Dependable and Secure Comput.* 1 (1), 66–86. 10.1109/TDSC.2004.1.
- [Leveson 2011] Leveson, N. G., 2011. Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety. MIT Press, Cambridge.
- [Liers 2010] Liers, H., 2010. Extension of the Euro NCAP effectiveness study with a focus on MAIS3+ injured pedestrians. Final report, VUFO GmbH.
- [Link 2011] Link, Heike, 2011. Verkehr und Wirtschaft. Die volkswirtschaftliche Bedeutung des Verkehrs. In: Schwedes, O. (Hrsg.): Verkehrspolitik. Eine interdisziplinäre Einführung, 91–114. VS Verlag für Sozialwissenschaften / Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [Little 2009] Little, A. D., 2009. Zukunft der Mobilität 2020. Die Automobilindustrie im Umbruch?, Arthur D. Little, Berlin.
- [Liu u. Lin 2011] Liu, S. Lin, Y., 2011. Grey Systems. Theory and Applications. 68, 2010, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Liyan u. Chunfu 2009] Liyan, Q., Chunfu, S., 2009. Macro Prediction Model of Road Traffic Accident Based on Neural Network and Genetic Algorithm I In: 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, Hunan, China, pp. 354–357.
- [Loader u. Hobbs 1999] Loader, R., Hobbs, J. E., 1999. Strategic responses to food safety legislation. *Food Policy* 24 (6), 685–706.
- [Lu et.al. 2001] Lu, X. Q., Chen, S. F., Li, N., 2001. Research on application of morphological, color features and neural network to the recognition of lung cancer cells, *Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics*, 13(1) (2001), 87–92.
- [Maier et.al. 2006] Maier, R., Ahrens, G.-A., Aurich, A. P., Bartz, C., Schiller, C., Winkler, C., Wittwer, R., 2006. Entwicklung der Verkehrssicherheit und ihrer Rahmenbedingungen bis 2015/2020: Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen. M 224. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
- [Mao u. Chirwa 2006] Mao, M., Chirwa, E. C., 2006. Application of grey model GM(1, 1) to vehicle fatality risk estimation. *Technological Forecasting and Social Change* 73 (5), 588–605. 10.1016/j.techfore.2004.08.004.
- [Martens 2011] Martens, M. H., 2011. Change detection in traffic: Where do we look and what do we perceive? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 14 (3), 240–250. 10.1016/j.trf.2011.01.004.
- [Maturana et.al. 1990] Maturana, H. R., Varela, F. J., 1990. Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens. Genehmigte Taschenbuchausg., 1. Aufl. Goldmann (Goldmann, 11460), München.
- [Maurer et.al. 2015] Maurer, M., Gerdes, C. J., Lenz, B., Winner, H. (Hrsg.), 2015. Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Springer, Berlin.
- [McGraw et.al. 2008] McGraw, C., Drennan, V., et al., 2008. Understanding risk and safety in home health care: the limits of generic frameworks. *Qual. Primary Care* 16(4), 239–248.

- [Meyer-Abich 1979] Meyer-Abich, K. M., 1979: Soziale Vertraglichkeit – ein Kriterium zur Beurteilung alternativer Energieversorgungssysteme. In: *Evangelische Theologie* 39 (1979), 38–51.
- [Meyer-Abich 1981] Meyer-Abich, K. M., 1981. Zum Problem der Sozialvertraglichkeit verschiedener Energieversorgungssysteme. In: Kruedener J. Schubert, K., (Hrsg.): *Technikfolgen und sozialer Wandel. Zur politischen Steuerbarkeit der Technik*, Verlag Wissenschaft und Politik, Köln, 41–56.
- [Miller 1956] Miller, G. A., 1956. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information. *Psychological Review* 63, 81–97.
- [Miller 1987] Miller, J., 1987. *Living Systems*. McGraw-Hill, New York.
- [Minami u. Madnick 2010] Minami, N., Madnick, S., 2010. Using System Dynamics to Improve Traffic Safety. Working Paper, Cambridge Mass.
- [Moghaddam et.al. 2011] Rezaie Moghaddam, F., Afandizadeh, S., Ziyadi, M., 2011. Prediction of accident severity using artificial neural networks. *International Journal of Civil Engineering* 9 (1), 41–49.
- [Mondal 2015] Mondal, K., 2015. The Application of Grey System Theory in predicting the Number of Deaths of Woman by committing Suicide. A Case Study. In: *Journal of Applied Quantitative Methods*, Vol. 10 (2015), Nr. 1.
- [Montgomery u. Jennings 2015] Montgomery, D. C., Jennings, C. L., Kulahci, M., 2015. *Introduction to time series analysis and forecasting*. Wiley, Hoboken, New Jersey, xiv, 643.
- [Morecroft 1988] Morecroft, J. D. W., 1988. System dynamics and microworlds for policy-makers. o. O.. In: *European Journal of Operational Research*, Volume 35 [1988], Ausgabe 3, 301–320.
- [Mühlenbein 1990] Mühlenbein, H., 1990. Limitations of multi-layer perceptron networks – steps towards genetic neural networks, *Parallel Computing*, Volume 14, Issue 3, 1990: 249–260.
- [Müller 2015] Müller, J.R., 2015. *Die Formalisierte Terminologie der Verlässlichkeit Technischer Systeme*, Springer, Berlin.
- [Nachimuthu u. Partheeban 2013] Nachimuthu, K., Partheeban, P., 2013. Development of a road accident prediction model based on system dynamics approach. *Indian Journal of Applied Research* 3 (9), 548–551.
- [Nader 1965] Nader, R., 1965. *Unsafe At Any Speed: The Designed-In Dangers of the American Automobile*. Grossman Publishers, New York.
- [New York Times 2018] New York Times, 2018. Self-Driving Uber Car Kills Pedestrian in Arizona, Where Robots Roam. The New York Times Company, New York.
- [Newman u. Watson 2011] Newnam, S., Watson, B., 2011. Work-related driving safety in light vehicle fleets: a review of past research and the development of an intervention framework. *Saf. Sci.* 49(3), 369–381.
- [Nielsen u. Nielsen 2008] Nielsen, S., Nielsen E. H., 2008. System dynamics modeling for a balanced scorecard: Computing the influence of skills, customers, and work in process on

- the return on capital employed. o. O.. In: Management Research News, Jahrgang 31 (2008), Ausgabe 3, 169–188.
- [Niemeyer 1977] Niemeyer, G., 1977. Kybernetische System- und Modelltheorie – system dynamics. Vahlen, Regensburg.
- [Noland 2013] Noland, R. B., 2013. From theory to practice in road safety policy: Understanding risk versus mobility. *Research in Transportation Economics* 43 (1), 71–84. 10.1016/j.ret-rec.2012.12.007.
- [Nonn 2009] Nonn, C., 2009. Analyse und Steigerung der Innovationsproduktivität – ein kompetenzbasierter und systemdynamischer Ansatz. Aachen. <<http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2010/3141/>>.
- [Ogwueleka et.al. 2014] Ogwueleka, F. N., Misra, S., Ogwueleka, T. C., Fernandez-Sanz, L., 2014. An Artificial Neural Network Model for Road Accident Prediction: A Case Study of a Developing Country. *Acta Polytechnica Hungarica* 11 (5), 177–197.
- [Omidvari u. Lashgray 2014] Omidvari, M., Lashgary, Z., 2014. Presenting a model for safety program performance assessment using grey system theory. *Grey Systems: Theory & Appl* 4 (2), 287–298. 10.1108/GS-01-2014-0001.
- [Opaschowski 2004] Opaschowski, H. W., 2004. Der Generationenpakt: das soziale Netz der Zukunft, Primus, Darmstadt.
- [Pai et al. 2007] Pai, T.-Y., Hanaki, K., Ho, H.-H., Hsieh, C.-M., 2007. Using grey system theory to evaluate transportation effects on air quality trends in Japan. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12 (2007), Heft 3, 158–166.
- [Parsons 1969] Parsons, T., 1959. General Theory in Sociology. In: Merton, R. (Ed.): *Sociology Today*. Harper & Row, New York, pp. 3–38.
- [Paschen et.al. 1978] Paschen, H., Gresser, K., Conrad, F., 1978. Technology Assessment – Technologiefolgenabschätzung, Campus, Frankfurt, New York.
- [Peterson 1980] Peterson, D. W., 1980. Statistical Tools for System Dynamics. . In: Randers, J. (Hrsg.): *Elements of the System Dynamics method*. MIT Press, Cambridge, 226–245.
- [Petri 1962] Petri, C. 1962. Kommunikation mit Automaten. Dissertation, Technische Hochschule, Darmstadt.
- [Pfeifer 2001] Pfeifer, T., 2001. Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken, 3., völlig überarb. und erw. Aufl., Hanser, München.
- [Pflaumer et al. 2005] Pflaumer, P., Heine, B., Hartung, J., 2005. Deskriptive Statistik. Lehr- und Übungsbuch. Lehr- und Übungsbuch, 3., überarb. u. erw. Aufl., Oldenbourg, München.
- [Piaget 1992] Piaget, J., 1992: Einführung in die genetische Erkenntnistheorie. 5. Aufl., Suhrkamp (Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, 6), Frankfurt am Main.
- [Plättner et.al. 2010] Plättner, J., Hüttinger, M., Reit, M., Ständer, T., Steininger, U., 2010. Fahrerassistenzsysteme im Spannungsfeld von Kundenerwartungen und Herstellerambitionen, München.
- [Poole 1986] Poole, M., 1986. Industrial Relations: Origins and Patterns of National Diversity. Routledge & Kegan Paul, London.

- [Popper 1935] Popper, K.R., 1935.: Logik der Forschung, Tübingen.
- [ProAct-URL 2018] ProACT-URL, 2018. Protect Project, In: <http://protectbenefitrisk.eu/ProACT-URL.html>.
- [Proff 2014] Proff, H. (Hrsg.), 2014. Radikale Innovationen in der Mobilität: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Springer, Berlin.
- [Pulm 2004] Pulm, U., 2004. Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung. Dissertation, München.
- [Pun u. Hui 2002] Pun, K.-F., Hui, I.-K., 2002. Integrating the safety dimension into quality management systems: a process model. *Total Qual. Manage.* 13(3), 373–391.
- [Qin 2006] Liyan, Qin, 2006: Research for Theory and Method of Road Traffic Accident Forecast and Prevention (D). Beijing Jiaotong University, 70–72.
- [Qin u. Shao 2009] Qin, L., Shao, C., 2009. Macro prediction model of road traffic accidents based on neural network and genetic algorithm. *Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 354–357.
- [Rajkumar u. Kumar 2002] Rajkumar, V., Kumar, V., 2002. A Genetic Algorithms Approach to Growth Phase Forecasting of Wireless Subscribe, *International Journal of Forecasting*, 18 (2002), 625–646.
- [Rasmussen 1997] Rasmussen, J., 1997. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety Science* 27 (2-3), 183–213. 10.1016/S0925-7535(97)00052-0.
- [Rasmussen 1997] Donges, E., 2012. Fahrerverhaltensmodelle. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 2. Aufl., 15–23. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- [Read et.al. 2013] Read, G. J. M., Salmon, P. M., Lenné, M. G., 2013. Sounding the warning bells: the need for a systems approach to understanding behaviour a trail level crossings. *Appl. Ergon.* 44(5), 764–774.
- [Reason 1990] Reason, J. T., 1990. *Human error*. Cambridge University Press, Cambridge, 302 pp.
- [Reason 2008] Reason, J., 2008. *The Human Contribution: Unsafe Acts, Accidents and Heroic Recoveries*. Ashgate, Farnham, 295 pp.
- [Redinger u. Levine 1998] Redinger, C. F., Levine, S. P., 1998. Development and evaluation of the Michigan occupational health and safety management system assessment instrument: a universal OHSMS performance measurement tool. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 59 (8), 572–581.
- [Reed et.al. 2010] Reed, M. S., Evely, A. C., Cundill, G., Fazey, I., Glass, J., Laing, A., Newig, J., Parrish, B., Prell, C., Raymond, C., Stringer, L. C., 2010. What is Social Learning? *Ecology and Science* 15 (4).
- [Reif 2010] Reif, M., 2010. Träger und Maßnahmen der integrierten Verkehrssicherheit. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* (2010), No. 04, 177.
- [Rettel u. Webber 1973] Rettel, H. W. J., Webber, M. M., 1973. Dilemmas in a general theory of planning. *Policy sciences* 4: 155–169.

- [Rey u. Wender 2011] Rey, G. D., Wender, K. F., 2011. Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung, 2., vollst. überarb. und erw. Aufl., Huber, Bern.
- [Richardson 2011] Richardson, G. P., 2011. Reflections on the foundations of system dynamics. *System Dynamics Review* 27 (3), 219–243. 10.1002/sdr.462.
- [Ropohl 1973] Ropohl, G. 1973. Eine Systemtheorie der Technik, Hanser, München.
- [Rojas 1993] Rojas, R., 1993. Theorie der neuronalen Netze – Eine systematische Einführung. Springer, Berlin.
- [SAE J3016] SAE J3016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, 2016-09-30, SAE.
- [SAFESPOT 2009] SAFESPOT Integrated Project, 2009. Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety, In: <http://www.safespot-eu.org/>.
- [Salmon et.al. 2012] Salmon, P. M., Cornelissen, M., Trotter, M. J., 2012. Systems-based accident analysis methods: A comparison of Accimap, HFACS, and STAMP. *Safety Science* 50 (4), 1158–1170. 10.1016/j.ssci.2011.11.009.
- [Salmon u. Lenné 2009] Salmon, P. M., Lenné, M. G., 2009. Systems-based Human Factors analysis of road traffic accidents: Barriers and solutions, in: 2009 Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference, New South Wales. 10.-13. November, Sydney, pp. 201–209.
- [Sauter et. al. 1990] Sauter, S. L., Murphy, L. R., et al., 1990. Prevention of work-related psychological disorders. A national strategy proposed by the National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). *Am. Psychol.* 45(10), 1146–1158.
- [Schindler 2011] Schindler, V., 2011. Berliner Erklärung zur Fahrzeugsicherheit, in: 8. VDI Tagung Fahrzeugsicherheit, Berlin.
- [Schlag 2004] Schlag, B., 2004. Verkehrspsychologie: Mobilität – Sicherheit – Fahrerassistenz. Pabst Science Publ., Lengerich, 388 pp.
- [Schläger et.al. 2016] Schläger, N., Wühlrl, B., Woywood, T., Fromberg, A., Gwiasda, P., Niklas, K., Schreiber, M., Pohle, M., 2016. Sicherheitsbewertung von Fahrradstraßen und der Öffnung von Einbahnstraßen. GDV, Berlin.
- [Schmidt 2009] Schmidt, S., 2008. Die Diffusion komplexer Produkte und Systeme: Ein systemdynamischer Ansatz. Dissertation der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Cottbus.
- [Schneider 1993] Schneider, B., 1993. Neuronale Netze für betriebliche Anwendungen: Anwendungspotentiale existierender Systeme. Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik 22, Münster.
- [Schnieder 1993] Schnieder, E., 1993. Prozeßinformatik – Einführung mit Petrinetzen Vieweg, Braunschweig.
- [Schnieder 1999] Schnieder, E., 1999. Methoden der Automatisierung: Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme. Vieweg, Braunschweig..

- [Schnieder 2003] Schnieder, E., 2003. Integration heterogener Modellwelten. In: Modelle, Werkzeuge und Infrastrukturen zur Unterstützung von Entwicklungsprozessen. DFG Workshop RWTH Aachen, Aachen. 20.-22.03. Wiley, Aachen, pp. 23–41.
- [Schnieder 2004] Schnieder, E., 2004. Ist Verkehrssicherheit berechenbar? Jahrbuch 2004 der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.
- [Schnieder 2007] Schnieder, E., 2007. Verkehrsleittechnik: Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs. Springer, Berlin.
- [Schnieder 2009] Schnieder, L., 2009. Formalisierte Terminologien technischer Systeme und ihrer Zuverlässigkeit. Dissertation, Braunschweig.
- [Schnieder 2014] Schnieder, E., 2014. (Verkehrs)sicherheit als regelungstechnische Aufgabe. *at – Automatisierungstechnik* 62 (12). 10.1515/auto-2014-1133.
- [Schnieder 2015] Schnieder, L., 2015. Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr: Ziele, Methoden, Konzepte, Springer, Berlin.
- [Schnieder u. Hosse 2015] Schnieder, E., Hosse, R. S., 2015. Potenziale von Fahrerassistenzsystemen für die Straßenverkehrssicherheit. *ZfAW (Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft)*. 18(4), November 2015, 6–13.
- [Schnieder u. Schnieder 2013] Schnieder, E., Schnieder, L., 2013. Verkehrssicherheit. Springer Berlin, Heidelberg.
- [Schöneborn 2004] Schöneborn, F., 2004. Strategisches Controlling mit System Dynamics. Physica, Heidelberg.
- [Schramm 2011] Schramm, S., 2011. Methode zur Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme. Dissertation, Technische Universität München.
- [Schramm u. Roth 2009] Schramm, S., Roth, F., 2009. Method to assess the effectiveness of active pedestrian protection systems. In 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV 2009), No. 09–0398.
- [Schubert et. al. 2000] Schubert, W. (Hrsg.), Schmädicke, J., Matthäi, J., Voigt, W., Händel, H.-R., Bach, E., Brückner, N., Jakubasch, K., Wöhl, G., Biebig, P., Laue, L., Schmidt, U., Stopka, S., Vock, W., 2000. Verkehrslogistik – Technik und Wirtschaft, Vahlen, München.
- [Schüffele 2010] Schüffele, J., 2010. Automotive Software Engineering. Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen, 4., überarbeitete und erweiterte Auflage., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- [Senge 2008] Senge, P. M., 2008. Die fünfte Disziplin: Kunst und Praxis der lernenden Organisation. Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- [Seppelt et.al. 2007] Seppelt, B. D., Lee, J. D., 2007. Making adaptive cruise control (ACC) limits visible. *International Journal of Human-Computer Studies* 65 (3), 192–205. 10.1016/j.ijhcs.2006.10.001.
- [Sinn 2003] Sinn, H.-W., 2003. Das demographische Defizit – die Fakten, die Folgen, die Ursachen und ihre Politikimplikationen. In: ifo Schnelldienst (2003), Heft 56.

- [Sitawarin et.al. 2018] Sitawarin, C., Bhagoji, A. N., Mosenia, A., Chiang, M., Mittal, P., 2018. DARTS: Deceiving Autonomous Cars with Toxic Signs. In: PACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies.
- [Slovák 2007] Slovák, R., 2007. Methodische Modellierung und Analyse von Sicherungssystemen des Eisenbahnverkehrs. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- [Smith 2005] Smith, A., 2005. Der Wohlstand der Nationen. Eine Untersuchung seiner Natur und seiner Ursachen. 11. Aufl. Hg. v. H. C. Recktenwald. Dt. Taschenbuch-Verl. [u.a.] (dtv-Kultur & Geschichte, 30149), München:.
- [Son et. al. 2011] Son, H. "D.", Kweon, Y.-J., Park, B. "B.", 2011. Development of crash prediction models with individual vehicular data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19 (6), 1353–1363. 10.1016/j.trc.2011.03.002.
- [Stang 1996] Stang, E., 1996. Chernobyl – system accident or human error? *Radiat. Prot. Dosim.* 68 (3–4), 197–201.
- [Ständer 2011] Ständer, T., 2011. Eine modellbasierte Methode zur Objektivierung der Risikoanalyse nach ISO 26262, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- [Stermann 2009] Sterman, J. D., 2009. *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill, Boston, 982 pp.
- [Stock 2014] Stock, W., 2014. *Verkehrsökonomie Taschenbuch*, Springer, Berlin.
- [Stolte et.al. 2015] Stolte, T., Hosse, R. S., Becker, U., Maurer, M., 2015. On Functional Safety of Vehicle Actuation Systems in the Context of Automated Driving. The 2016 American Control Conference, June 2016. IFAC.
- [Svenson 1981] Svenson, O., 1981. Are we all less risky and more skillful than our fellow drivers. *Acta Psychologica* 47, 143–148.
- [Thiesing 1998] Thiesing, F. M., 1998. *Analyse und Prognose von Zeitreihen mit Neuronen Netzen*. Shaker, Aachen.
- [Torres et.al. 2012] Soto Torres, D., Fernandez Lechon, R., Fernandez Soto, P., 2012. Road Safety Strategies: An analysis with system dynamics. In: *Proceedings of the 30th international conference of the system dynamics society*, St. Gallen, Schweiz. System Dynamics Society, St. Gallen, Schweiz.
- [Treyer 2003] Treyer, Oscar A. G., 2003 *Business Statistik. Anwendungsorientierte Theorie mit Beispielen, Aufgaben mit kommentierten Lösungen, Glossar*, 1. Aufl., Compendio, Zürich.
- [Ulrich 1970] Ulrich, H., 1970. *Die Unternehmung als produktives soziales System: Grundlagen der allgemeinen Unternehmungslehre*. 2. Auflage, Haupt, Bern, Stuttgart..
- [Ulrich u. Probst 1995] Ulrich, H., Probst, G. J. B., 1995. *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: ein Brevier für Führungskräfte*. 4. Auflage, Haupt, Bern (u. a.).
- [Van Auken et.al. 2011] Van Auken, R. M., Zellner, J. W., Chiang, D. P., Kelly, J., Silberling, J. Y., Dai, R., et al., 2011. *Advanced Crash Avoidance Technologies (ACAT) Program – Final Report of the Honda-DRI Team, Volume I: Executive Summary and Technical Report*. Technical Report DOT HS 811 454A, Dynamic Research Inc./National Highway Traffic Safety Administration.

- [Vanderbilt et.al. 2009] Vanderbilt, T., Schermer-Rauwolf, G., Weis, R. A., 2009. Auto: Warum wir fahren, wie wir fahren und was das über uns sagt, 1st ed. Hoffmann und Campe, Hamburg, 480 pp.
- [VDI 2016] VDI: Berliner Erklärung zur Fahrzeugsicherheit, 2016. In: https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/news_bilder/News_FVT/Berliner_Erklaerung_VDI-FVT.pdf.
- [Vester 2011] Vester, F., 2011. Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome; [der neue Bericht an den Club of Rome], 8th ed. Deutscher Taschenbuch-Verlag, München, 373 pp.
- [Vogel 2015] Vogel, J., 2015. Prognose von Zeitreihen. Eine Einführung für Wirtschaftswissenschaftler, Springer Gabler, Wiesbaden.
- [Vogelpohl et.al. 2016] Vogelpohl, T., Vollrath, M., Kühn, M., Hummel, T., Gehlert, T., 2016. Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung: Review der Literatur und Studie zu Übernahmezeiten. GDV, Berlin.
- [Vollrath et.al. 2015] Vollrath, M., Huemer, A.K., Nowak, P., Pion, O., Hummel, T., 2015. Ablenkung durch Informations- und Kommunikationssysteme: Unfallforschung der Versicherer. GDV e.V.
- [Vollrath u. Briest 2008] Vollrath, M. & Briest, S., 2008. „Ich habe den einfach nicht gesehen“ – Ursachen für menschliche Fehler bei Autounfällen. In: J. Schade & G. Weller (Hrsg.), Fortschritte der Verkehrspsychologie. Beiträge vom 45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, 143–158. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- [Wallnöfer 2009] Wallnöfer, K., 2009. Europarecht. Verkehr als Gegenstand europarechtlicher Untersuchungen. In: Bauer, L. (Hrsg.): Handbuch Verkehrsrecht. [Schadensersatzrecht, Versicherungsrecht, Straßenverkehr, Transportrecht, Straßenrecht, Schiene, Schiff, Luft], 41–60. Facultas, Wien.
- [Wang et.al. 2003] Chongjun, Wang, Wendi, Yu, Zhaokun, Chen, Junyuan, Xie: A BP Neural Network Algorithm based on Genetic Algorithms and Its Application, Journal of Nanjing University, 2003, 39, (5), 459–460.
- [Wang et.al. 2012] Wang, L., Zhu, J., Lu, H.-p., Zheng, Y., 2012. Forecasting of Traffic Accident in Shanxi Province Based on Grey System Theory, in: 2012 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), Nanjing, Jiangsu, China, pp. 1–4.
- [Wansart 2012] Wansart, J., 2012. Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO₂-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [Wansart u. Schnieder 2007] Wansart, J., Schnieder, E., 2007. Qualifizierung des Nutzens von Fahrerassistenzsystemen im Automobil, in: Tagungsband des 8. Braunschweiger Symposiums „Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme, eingebettete Systeme für Transportmittel“. AAET, Braunschweig. GZVB e.V., Braunschweig, pp. 103–120.
- [Wansart u. Schnieder 2008] Wansart, J., Schnieder, E., 2008. Modellbasierte Prognose der Absatzentwicklung neuer Fahrerassistenzsysteme, in: 24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, Düsseldorf. VDI-Verl., Düsseldorf.

- [Watson u. Schneider 2014] Watson, R., Schneider, R., 2014. 50 Schlüsselideen der Zukunft, Springer Spektrum, Berlin.
- [Wegman et.al. 1995] Wegman, F., Holló, P., et al., 1995. Road Accidents: Worldwide a Problem that can be Tackled Successfully!. Leidschendam, SWOV.
- [Weinstein 1996] Weinstein, M. B., 1996. Total quality approach to safety management. Prof. Saf. 41 (7), 18–22.
- [Welfonder 2007] Welfonder, E., 2007. Sinnvolle sozio-ökonomische Weiterentwicklung der globalisierten Gesellschaft (Sustainable Further Socio-economic Evolution of the Globalized Society). at – Automatisierungstechnik 55 (8). 10.1524/auto.2007.55.8.418.
- [Welte 2012] Welte, J., 2012. Kopplung von System Dynamics mit Petrinetzen zur Gefährdungsanalyse vernetzter Verkehrssysteme. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig.
- [Wen-Hui et.al. 2010] Zhang W.-h., Deng H.-x., Wang X.-b., 2010. Safety factor analysis for traffic accident scene based on computer simulation. In: 2010 International Conference on Computer Design and Applications (ICCD 2010), Qinhuangdao, China, V5-89-V5-91.
- [Weth et.al. 2002] Weth, R. von der, Strohschneider, S., Dörner, D., 2002. Ja, mach nur einen Plan. Pannen und Fehlschläge – Ursachen, Beispiele, Lösungen. 2., vollst. überarb., erw. und aktualisierte Aufl. H. Huber (Aus dem Programm Huber. Psychologie-Forschung); Bern.
- [Whitefield 2009] Whitefield, D., 2009. Is that a gap in your safety culture – a discussion paper on leading safety excellence. In: Society of Petroleum Engineers – SPE/IATMI Asia Pacific Health Safety, Security and Environment Conference and Exhibition 2009, APHSSEC 09, Jakarta.
- [WHO 2015] WHO, 2015. Global Status Report on Road Safety 2015, Geneva, Schweiz.
- [Woisetschläger 2007] Woisetschläger, D. Markenwirkung von Sponsoring: Eine Zeitreihenanalyse am Beispiel des Formel 1-Engagements eines Automobilherstellers, Springer, Berlin.
- [Wiener 1948] Wiener, N. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. MIT Press, Massachusetts.
- [Wille et.al. 2012] Wille, J., Jungbluth, A., Kosiek, A., Zatloukal, M., 2012. rateEFFECT – Entwicklung eines Werkzeugs zur Effizienzbewertung von Fahrerassistenzsystemen, In: http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/27_Wille.pdf, Technische Universität München.
- [Wiltschko 2003] Wiltschko, T., 2003. Mikroskopische Unfallanalyse zur Identifikation von Wirkungsfeldern zukünftiger Fahrerassistenzsysteme. Proceedings der Verkehrswissenschaftliche Tage 19.
- [Wiltschko 2004] Wiltschko, T., 2004. Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. VDI-Verl., Düsseldorf.
- [Winner 2009] Winner, H., 2009. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort; mit 45 Tabellen, 1st ed. Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.

- [Xie u. Mei 2001] Xie, C.; Mei, J., 2001, Application of Genetic Algorithm in Artificial Neural Network Weights Optimizing, Journal of South-Central University for Nationalities, (9) 2001.
- [Yannis et.al. 2011] Yannis, G., Antoniou, C., Papadimitriou, E., 2011. Autoregressive nonlinear time-series modeling of traffic fatalities in Europe. Eur. Transp. Res. Rev. 3 (3), 113–127. 10.1007/s12544-011-0055-4.
- [Yu et.al. 2008] Yu, R.-d., Qiang, Z., Zhang-Xiaohong, H.-L., 2013. Traffic Accidents forecasting based on Neural Network and Principal Component Analysis. Research Journal fo Applied Sciences, Engineering and Technology 6 (6), 1065–1073.
- [Zangmeister et.al. 2009] Zangmeister, T., Kreiß, J.-P., Page, Y., & Cuny, 2009. Evaluation of the safety benefits of passive and/or on-board active safety applications with mass accident data-bases. In 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV 2009), No. 09–0222.
- [Zell 1997] Zell, A., 1997. Simulation Neuronaler Netze. Addison-Wesley, Bonn.
- [Zhang et.al. 1998] Zhang, G., Patuwo, B. E., Hu, M. Y., 1998. Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. International Journal of Forecasting , 14, 35–62.
- [Zhou et.al. 2000] Zhihua, Z., Zhaokun, C. Shifu, C., 2000. Research of field theory based adaptive resonance neural network, Journal of Nanjing University, 2000, 36, (2), 140–147.
- [Zimmerli 1982] Zimmerli W. C., 1982. Prognose und Wert: Grenzen einer Philosophie des ‚Technology Assessment‘. In: Rapp F., Durbin P. T. (Hrsg.) Technikphilosophie in der Diskussion. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.
- [Zimmermann et.al. 2009] Zimmermann, M., Georgi, A., Lich, T., & Marchthaler, R. (2009). Nutzenanalyse für Auffahrunfälle vermeidende Sicherheitssysteme. In: AAET 2009 – Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (pp. 78–86), Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig e.V., Ed.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Vergleich Verunglückter, Getöteter und ausgewählter Maßnahmen, in Anlehnung an [GIZ 2015] [destatis 2017].....	4
Abbildung 1-2: Prozess der Entscheidungsbildung als Regelungsstruktur, in Anlehnung an [Hosse et.al. 2012].....	6
Abbildung 1-3: Modell der Risikogenese, in Anlehnung an [Schnieder u. Schnieder 2014]	11
Abbildung 1-4: Abgrenzung dieser Arbeit, in Anlehnung an [Maier et.al. 2006]	12
Abbildung 1-5: Konzept der Wirkfeld-Prognose.....	13
Abbildung 1-6: Struktur und Aufbau der Arbeit	14
Abbildung 2-1: Geschätztes Sicherheitspotential aktiver und passiver verkehrsmittelseitiger Maßnahmen, in Anlehnung an [DVR 2006]	21
Abbildung 2-2: Park- und Rangierunfälle nach Ausstattung, nach [Lauterwasser 2016].....	22
Abbildung 2-3:Unfallverursachungsanteile, in Anlehnung an [Schlag 2004] [Winner 2009]	24
Abbildung 2-4: Fähigkeiten-Anforderungen-SchnittstellenModell nach [Fuller u. Santos 2002].....	25
Abbildung 3-1: Modellentwicklungsprozess, in Anlehnung an v-Model und [Sterman 2004].....	37
Abbildung 4-1: Grundlegende Konzepte mathematischer und systemtheoretischer Modelle der Verkehrssicherheit	42
Abbildung 4-2: Darstellung und Vergleich einer Black Box und White Box	46
Abbildung 4-3: Prinzipieller Aufbau eines Grey-Modells.....	47
Abbildung 4-4: Analyse und Prognose von Zeitreihen mit künstlichen neuronalen Netzen anhand exogener Zeitreihen (vertikale und horizontale Prognose), in Anlehnung an [Thiesing 1998] und [Haar 2011].....	50
Abbildung 4-5: Modellstruktur zur stochastischen Prognose des Unfallgeschehens, nach [Maier et.al. 2006].....	52
Abbildung 4-6 Statistische Erhebung zur Bestimmung der Verteilungsfunktionen für Schadensausmaß und Schadenshäufigkeit, nach [Schnieder 2014] [Buxhoeveden u. Becker 2016]	55
Abbildung 5-1: Klassisches Modellkonzept der Unfallforschung, in Anlehnung an [Daenzer 1988] und [Grigoryev 2015]	73
Abbildung 5-2: Mikroskopischer Verkehrsprozess im Drei-Ebenen-Modell als Regelungsstruktur, in Anlehnung an [Rasmussen 1997] [Rasmussen 1997] [Wiltshko 2004]	75
Abbildung 5-3: Makroskopischer Verkehrsprozess als komplexe Regelungsstruktur, in Anlehnung an [Welfonder 2007] [Schnieder 2014] [Leveson 2011].....	76
Abbildung 5-4: Regelungstechnisches Blockschaltbild Expositions- bzw. Schadens- und des Gefährdungsverhaltens, nach [Schnieder 2014]	77

Abbildung 5-5: Regelungstechnisches Modell eines soziotechnischen Systems, nach [Welfonder 2007]	78
Abbildung 5-6: Kausalschleifendiagramm der Verkehrssicherheit unter Einfluss ausgewählter Maßnahmen, nach [Hosse 2011]	81
Abbildung 5-7: Dynamische Hypothese der Straßenverkehrssicherheit als Kausalschleifendiagramm [Hosse 2011].....	82
Abbildung 5-8: Generisches und konkretes Systemmodell mit Emergenzrelationen, in Anlehnung an [Schnieder 2009].....	84
Abbildung 6-1: Vorgehensmodell der Qualifizierung	90
Abbildung 6-2: Blockbild des GM(1,1), in Anlehnung an [Liu u. Lin 2011].....	91
Abbildung 6-3: Qualifizierung des GM(1,1) mit Jahresgang-Zeitreihen.....	92
Abbildung 6-4: Qualifizierung des GM(1,1) mit Monatsgang-Zeitreihen.....	93
Abbildung 6-5: Blockbild des GM(1,N), in Anlehnung an [Liu u. Lin 2011].....	93
Abbildung 6-6: Qualifizierung des GM(2,1) mit Jahresgang-Zeitreihen.....	95
Abbildung 6-7: Qualifizierung des GM(2,1) mit Monatsgang-Zeitreihen.....	95
Abbildung 6-8: Blockbild des MGM(1,n).....	96
Abbildung 6-9: Qualifizierung des MGM(1,3) mit Jahresgang-Zeitreihen	97
Abbildung 6-10: Qualifizierung des MGM(1,2) mit Montagsgang-Zeitreihen.....	97
Abbildung 6-11: Vergleich verschiedener Trainingsergebnisse einer NN-basierten VS-Prognose	98
Abbildung 6-12: Quantisiertes Lager-Fluss-Diagramm der Verkehrssicherheitsprognose, in Anlehnung an [Brockschnieder 2014].....	100
Abbildung 6-13: Vergleich der Simulationsergebnisse in kumulierter Darstellung	101
Abbildung 6-14: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	102
Abbildung 6-15: Integration Neuroner Netze, Genetischer Algorithmen und Fuzzy-Logik [Ahmadizar 2015].....	103
Abbildung 6-16: Prozess des GABP-Verfahrens, in Anlehnung an [Ahmadizar 2015]	103
Abbildung 6-17: Vergleich zwischen Rohdaten und den Ergebnissen von NN	104
Abbildung 6-18: Ergebnisse der GABP Prognose	104
Abbildung 6-19: Modellkonzept der Hybridisierung SD mit GST.....	105
Abbildung 6-20: Ergebnisse der SD-GST-Prognose.....	106
Abbildung 6-21: Konzeption des formalen Zusammenhangs des Sicherheitspotentials.....	109
Abbildung 6-22: Konzept des Sicherheitspotentials in der modellbaiserten Verkehrssicherheitsprognose.....	110
Abbildung 6-23: Definition des Sicherheitsgewinns, in Anlehnung an [Busch 2005]	111
Abbildung 6-24: Modell der Straßenverkehrssicherheitsprognose	114

Abbildung 6-25: Grundlegender Backpropagations-Algorithmus	116
Abbildung 6-26: Grundlegender genetischer Algorithmus	117
Abbildung 6-27: Prozessmodell des GABP Verfahrens	118
Abbildung 7-1: Sicherheitspotentialzeitreihen der relevanten Maßnahmen	133
Abbildung 7-2: Sicherheitspotentiale außerhalb von Ortschaften	135
Abbildung 7-3: Prognose der Getöteten außerhalb von Ortschaften.....	136
Abbildung 7-4: Sicherheitspotentiale innerhalb von Ortschaften.....	137
Abbildung 7-5: Prognose der Getöteten innerhalb von Ortschaften	137
Abbildung 7-6: Sicherheitspotentiale auf Autobahnen	138
Abbildung 7-7: Prognose der Getöteten auf Autobahnen	138
Abbildung 7-8: Sicherheitspotentiale im Baustellenbereich	139
Abbildung 7-9: Prognose der Getöteten im Baustellenbereich.....	140
Abbildung 7-10: Sicherheitspotentiale auf Bundesstraßen	140
Abbildung 7-11: Prognose der Getöteten auf Bundesstraßen	141
Abbildung 7-12: Sicherheitspotentiale auf Kreisstraßen.....	142
Abbildung 7-13: Prognose der Getöteten auf Kreisstraßen.....	142
Abbildung 7-14: Sicherheitspotentiale an Fußgängerüberwegen	143
Abbildung 7-15: Prognose der Getöteten an Fußgängerüberwegen	143
Abbildung 7-16: Sicherheitspotentiale an Bahnübergängen.....	144
Abbildung 7-17: Prognose des Unfallaufkommens an Bahnübergängen	145
Abbildung 7-18: Sicherheitspotentiale bei Tageslichtverhältnissen	145
Abbildung 7-19: Prognose der Getöteten bei Tageslichtverhältnissen	146
Abbildung 7-20: Sicherheitspotentiale bei Dämmerungsverhältnissen	147
Abbildung 7-21: Prognose der Getöteten bei Dämmerungsverhältnissen	147
Abbildung 7-22: Sicherheitspotentiale bei Dunkelheit	148
Abbildung 7-23: Prognose der Getöteten bei Dunkelheit	148
Abbildung 7-24: Sicherheitspotentiale bei Nebel.....	149
Abbildung 7-25: Prognose der Getöteten bei Nebel	150
Abbildung 7-26: Sicherheitspotentiale bei Übermüdung.....	150
Abbildung 7-27: Prognose der Getöteten durch Übermüdung.....	151
Abbildung 7-28: Sicherheitspotentiale bei Alkoholeinfluss	152
Abbildung 7-29: Prognose der Getöteten durch Alkoholeinfluss.....	152
Abbildung 7-30: Sicherheitspotentiale bei Baumunfällen.....	153

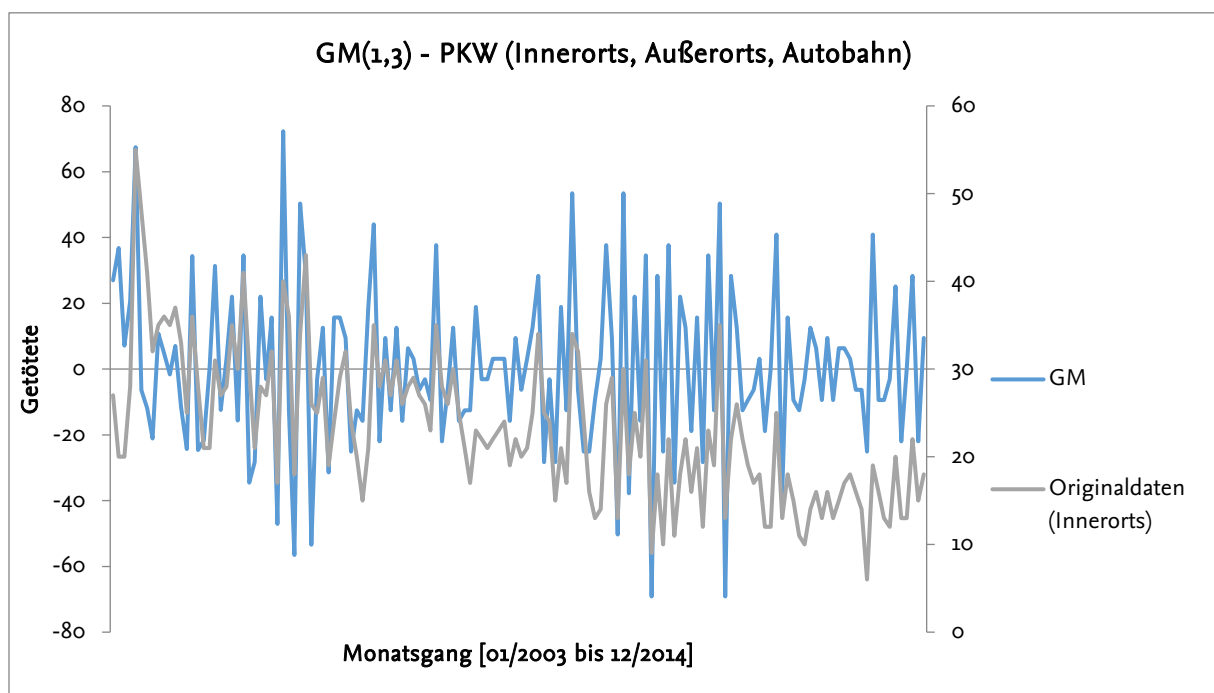
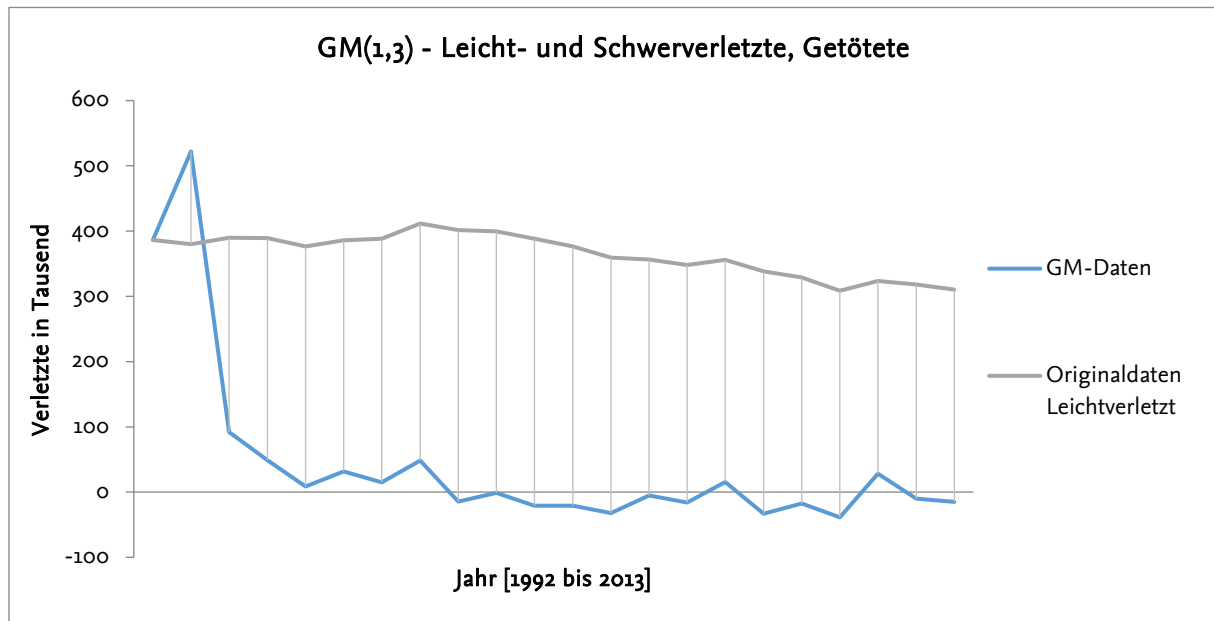
Abbildung 7-31: Prognose der Getöteten durch Baumunfälle.....	153
Abbildung 7-32: Sicherheitspotentiale bei Wildunfällen	154
Abbildung 7-33: Prognose der Getöteten durch Wildunfälle	154
Abbildung 7-34: Sicherheitspotential von HAF	158
Abbildung 7-35: Prognose der Getöteten unter Einfluss von HAF	159
Abbildung 8-1: Konzept für ein repräsentatives virtuelles Verkehrssystemmodell.....	165

Tabellenverzeichnis

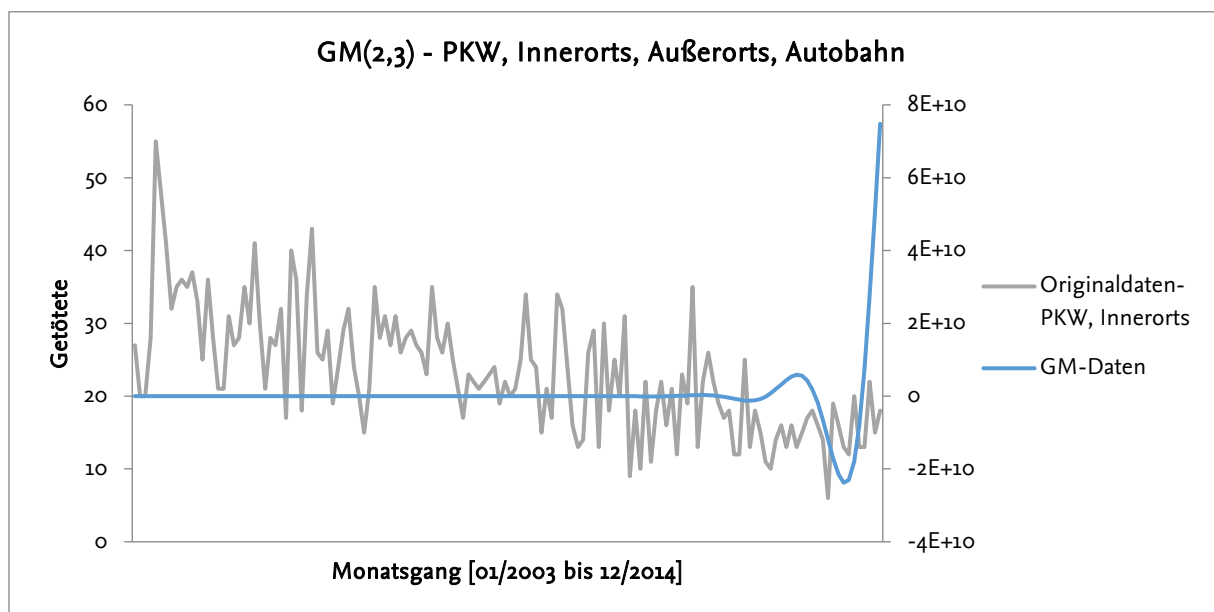
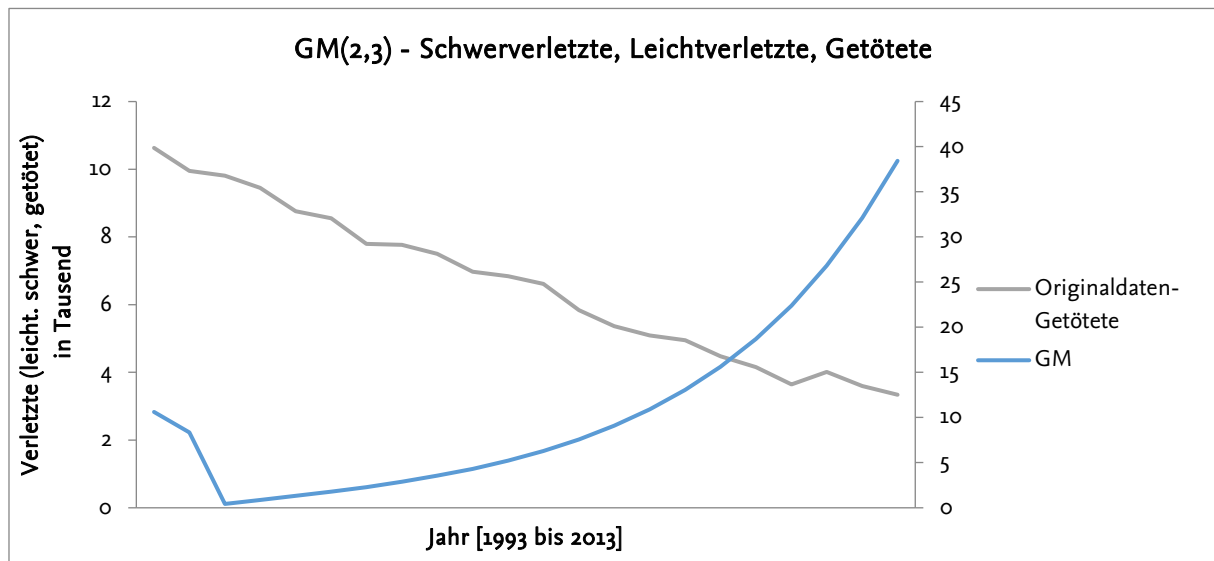
Tabelle 1-1: Tödliches Unfallaufkommen nach Verkehrslage und Beteiligungsart 2016, nach [destatis 2017]	4
Tabelle 2-1: Zuordnung von Gefährdungsquellen zu Phasen, Funktionen, Ressourcen und Schadenssenken im Verkehrssystem, nach [Schnieder u. Schnieder 2013]	19
Tabelle 4-1: Einteilung der Grey Modelle und ihrer Merkmale, in Anlehnung an [Schnieder u. Hosse 2016]	48
Tabelle 4-2: Vergleich des prognostizierten Unfallaufkommens zum realen Unfallaufkommen, in Anlehnung an [Maier et.al. 2006]	53
Tabelle 4-3: Eignungsfähigkeit relevanter Modellarten und Prognoseverfahren, in Anlehnung an [Hughes et.al. 2015]	62
Tabelle 6-1: Anforderungen hinsichtlich der Modellvereinfachung und -diskretisierung	86
Tabelle 6-2: Anforderungen hinsichtlich des Modellkonzepts und der -parameter	87
Tabelle 6-3: Anforderungen hinsichtlich des physikalischen Gültigkeitsbereichs des Modells	88
Tabelle 6-4: Anforderungen hinsichtlich der Modellgrenzen	89
Tabelle 6-5: Anforderungen hinsichtlich der zulässigen Grenzwerte und Abweichungen	90
Tabelle 6-6: Variation der exogenen Modell-Parameter	101
Tabelle 6-7: Erfüllungsgrad der Anforderungen der datenbasierten Prognoseverfahren	107
Tabelle 6-8: Erfüllungsgrad der Anforderungen der modellbasierten Prognoseverfahren	108
Tabelle 7-1: Verkehrsmittelseitige Maßnahmen mit ausreichender Datenbasis, in Anlehnung an [Grune 2016]	129
Tabelle 7-2: Identifizierung der verwendeten Unfalldatenbank	130
Tabelle 7-3: Codierung der Wirkfelder der Unfalldatenbank als Zielvariablen	131
Tabelle 7-4: Identifizierte Kausalzeitreihen	134
Tabelle 7-5: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Autobahn	139
Tabelle 7-6: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Baustellenbereich	140
Tabelle 7-7: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Bundesstraßen	141
Tabelle 7-8: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Kreisstraßen	143
Tabelle 7-9: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Fußgängerüberwege	144
Tabelle 7-10: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Bahnübergänge	145
Tabelle 7-11: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Tageslichtverhältnisse	146
Tabelle 7-12: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Dämmerungsverhältnisse	148
Tabelle 7-13: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Dunkelheit	149
Tabelle 7-14: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Nebel	150

Tabelle 7-15: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Übermüdung.....	151
Tabelle 7-16: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Alkoholeinfluss	152
Tabelle 7-17: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Baumunfälle.....	154
Tabelle 7-18: Korrelationswerte der Maßnahmen im Wirkfeld Wildunfälle.....	155
Tabelle 7-19: Parameter für hochautomatisiertes Fahren	158

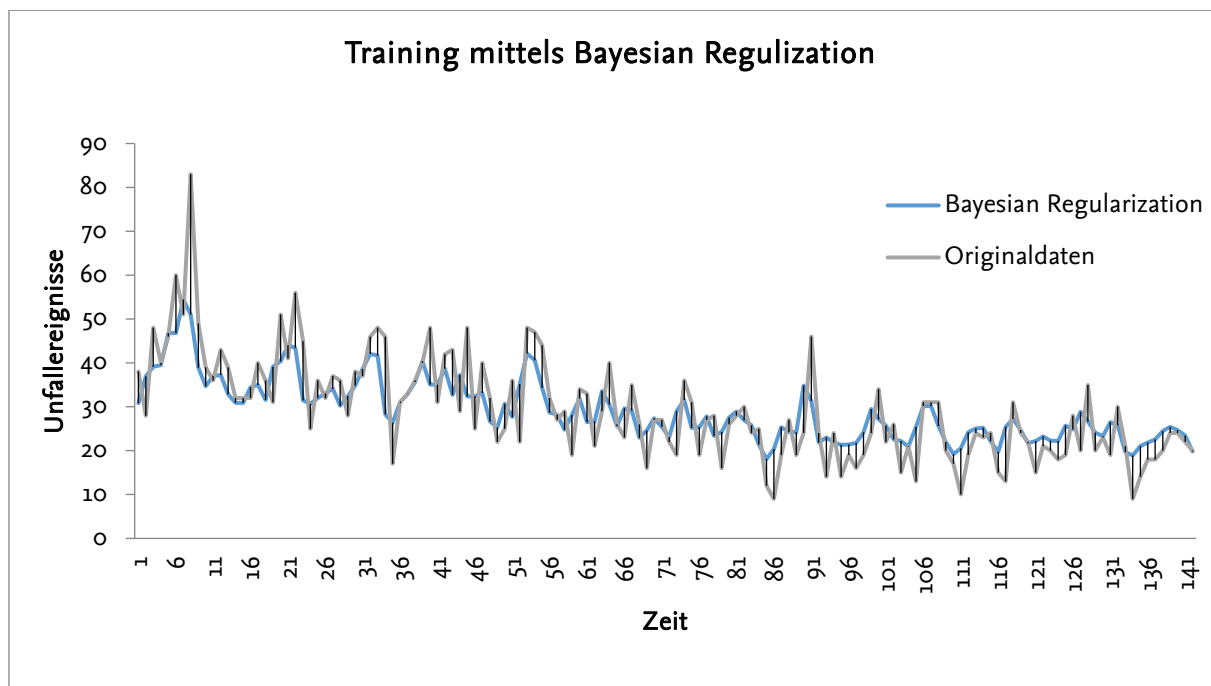
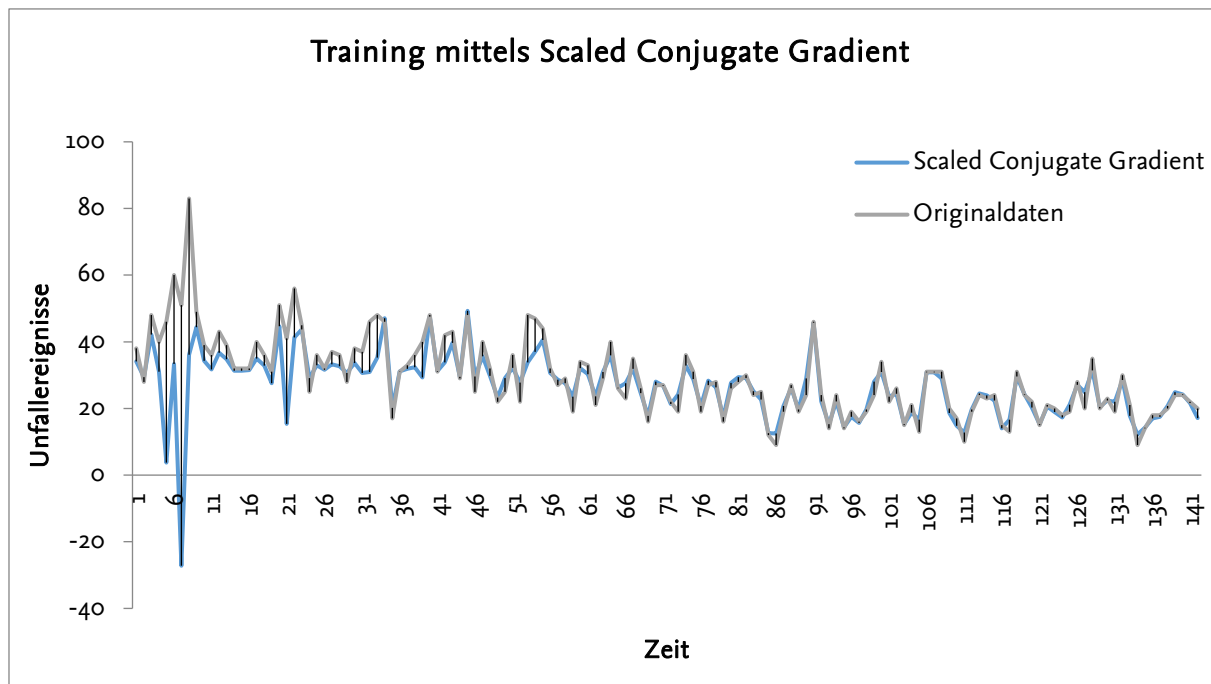
Anhang A: Anwendung GM(1,3)

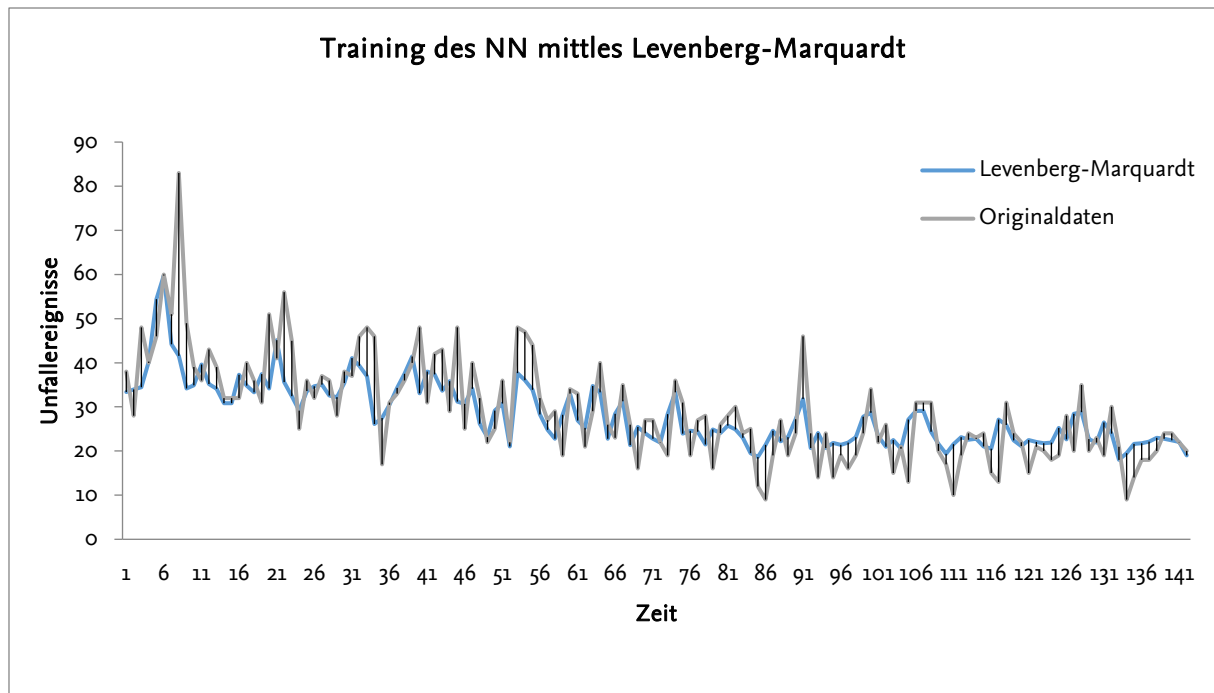


Anhang B: Anwendung GM(2,3)



Anhang C: Anwendung unterschiedlicher Trainingsalgorithmen





Anhang D: System Dynamics Modell

- (01) $\text{Anmeldungsrate} = \text{Neuanmeldungen PKW} * \text{Marktdurchdringungsrate} \text{ Neuanmeldungen} / \text{Normierung}$
Units: Stück/Year
- (02) $\text{Einführung FAS} = \text{INTEG}(\text{Einführungsrate}, 1)$
Units: Stück
- (03) $\text{Einführungsrate} = \text{Entwicklung FAS} / \text{Einführungszeit}$
Units: Stück/Year
- (04) $\text{Einführungszeit} = 7$
Units: Year
- (05) $\text{Eingriffshäufigkeit} = 0.36$
Units: dmnl
- (06) $\text{Entwicklung FAS} = \text{INTEG}(\text{Prozessrate} - \text{Einführungsrate}, 1)$
Units: Stück
- (07) $\text{Erkenntnisrate} = 1e-005$
Units: dmnl
- (08) $\text{FINAL TIME} = 20$
Units: Year
The final time for the simulation.
- (09) $\text{INITIAL TIME} = 0$
Units: Year
The initial time for the simulation.
- (10) $\text{Marktdurchdringung} = \text{MIN}(1, \text{Neuanmeldungen PKW mit FAS} / \text{PKW Bestand})$
Units: dmnl
- (11) $\text{Marktdurchdringungsrate Neuanmeldungen} = \text{WITH LOOKUP}(\text{Zeithorizont} / \text{Normierung}, [(0,0)-(12,10)], (0,0.01), (3,0.08), (6,0.3), (9,0.7), (12,0.99), (20,0.99)))$
Units: dmnl
- (12) $\text{Neuanmeldungen PKW} = 3.2e+006$
Units: Stück
- (13) $\text{Neuanmeldungen PKW mit FAS} = \text{INTEG}(\text{Anmeldungsrate}, 1)$
Units: Stück
- (14) $\text{neue Erkenntnisse} = \text{Erkenntnisrate} * \text{Unfallschwere}$
Units: Stück/Year
- (15) $\text{neue Maßnahmen FAS} = \text{INTEG}(\text{neue Erkenntnisse} - \text{Prozessrate}, 1)$
Units: Stück
- (16) $\text{Normierung} = 1$
Units: Year
- (17) $\text{PKW Bestand} = 4.3e+007$
Units: Stück
- (18) $\text{Prozessrate} = \text{neue Maßnahmen FAS} / \text{Prozesszeit}$
Units: Stück/Year
- (19) $\text{Prozesszeit} = 7$
Units: Year
- (20) $\text{SAVEPER} = 1$
Units: Year [0,?]

- The frequency with which output is stored.
- (21) Sicherheitsgewinn = Marktdurchdringung+Sicherheitspotential+Eingriffshäufigkeit
Units: dmnI
- (22) Sicherheitspotential = Sicherheitspotentialrate*Einführung FAS
Units: dmnI
- (23) Sicherheitspotentialrate = 0.55
Units: 1/Stück
- (24) TIME STEP = 0.25
Units: Year [0,?]
The time step for the simulation.
- (25) tödliche Unfallrate Basisjahr = 0.003
Units: 1/Year
- (26) tödliche Unfälle = INTEG (Unfallschwere, 7500)
Units: Stück
- (27) Unfallschwere = tödliche Unfallrate Basisjahr*Unfälle/Sicherheitsgewinn
Units: Stück/Year
- (28) Unfälle = 2.3e+006
Units: Stück
- (29) Zeithorizont = INTEG (1,0)
Units: Year

Anhang E: Prüfung der Anforderungen der qualifizierten Methoden

Anforderungen hinsichtlich der Modellvereinfachung und -diskretisierung:

Nr.	Anforderung	GM(1,1)	GM(2,1)	MGM(1,3)	NN	SD	NN-GA	SD-GST
Anf_01	Das Prognosemodell kann zwischen Fahrzeugklassen unterscheiden	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Anf_02	Das Prognosemodell muss ausreichend einfach aufgebaut werden, so dass es mittels verfügbarer Computerrechenleistung simuliert werden kann	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	(Ja)	(Ja)
Anf_03	Das Prognosemodell muss die Wirkung aller Arten von Verkehrssicherheitsmaßnahmen am Verkehrsmittel prognostizieren können	Nein	Nein	Nein	(Ja)	(Ja)	Ja	Ja
Anf_04	Das Prognosemodell muss die Wirkung aller Arten von Verkehrssicherheitsmaßnahmen am Verkehrsobjekt prognostizieren können	Nein	Nein	Nein	(Ja)	(Ja)	Ja	Ja
Anf_05	Das Prognosemodell muss die Wirkung aller Arten von Verkehrssicherheitsmaßnahmen an der Verkehrsinfrastruktur prognostizieren können	Nein	Nein	Nein	(Ja)	(Ja)	Ja	Ja
Anf_06	Das Prognosemodell muss die Wirkung aller Arten von Verkehrssicherheitsmaßnahmen an der Verkehrsorganisation prognostizieren können	Nein	Nein	Nein	(Ja)	(Ja)	Ja	Ja
Anf_07	Das Prognosemodell muss das Unfallaufkommen für aller statistisch erfassten Arten von Unfällen im Verkehrssystem betrachten können	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Zusammenfassung		-	-	-	o	+	++	++

Anforderungen hinsichtlich des Modellkonzepts und der -parameter:

Nr.	Anforderung	GM(1,1)	GM(2,1)	MGM(1,3)	NN	SD	NN-GA	SD-GST
Anf_08	Das Prognosemodell muss ein Modellkonzept verwenden, welches bei vorliegender Vereinfachung ein hinreichend genaues Systemverhalten abbildet	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Anf_09	Wenn das Modell mittels eines systemtheoretischen Modellkonzepts realisiert wird, müssen kausale Zusammenhänge soweit möglich zerlegt werden	X	X	X	X	(Ja)	X	Ja
Anf_10	Bei Verwendung eines systemtheoretischen Modellkonzepts, muss das Prognosemodell allgemein gültige kausale Zusammenhänge nutzen; diese müssen belegt werden	X	X	X	X	(Ja)	X	Ja
Anf_11	Das Prognosemodell muss ein einheitliches Sicherheitsmaß für die Wirkung von Verkehrssicherheitsmaßnahmen definieren	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Anf_12	Das Prognosemodell muss den inneren Aufbau des modellierten Verkehrssystems glaubwürdig wiedergeben	Nein	Nein	Nein	(Ja)	Ja	(Ja)	Ja
Anf_13	Das Prognosemodell muss ein Modellkonzept verwenden, welches mittels einer öffentlich verfügbaren Datenbasis eine Prognose herstellen kann	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Anf_14	Das Prognosemodell muss eine beliebig große Anzahl von Einflussfaktoren in die Prognose einbeziehen können	Nein	Nein	Nein	Ja	(Ja)	Ja	(Ja)
Anf_15	Das Prognosemodell muss zum Zeitpunkt der Modellbildung nicht bekannte Systemantworten mit hinreichender Genauigkeit wiedergeben	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja

Nr.	Anforderung	GM(1,1)	GM(2,1)	MGM(1,3)	NN	SD	NN-GA	SD-GST
Anf_16	Wenn das Modell mittels mathematischer Modellkonzepte realisiert wird, muss das Prognosemodell einen fest gewählten Diskretisierungsabstand wählen	Ja	Ja	Ja	Ja	X	Ja	Ja
Zusammenfassung		+	--	++	+	++	++	++

Anforderungen hinsichtlich des physikalischen Gültigkeitsbereichs des Modells

Nr.	Anforderung	GM(1,1)	GM(2,1)	MGM(1,3)	NN	SD	NN-GA	SD-GST
Anf_17	Das Prognosemodell muss bekannte Verkehrssicherheitsbeobachtungen mit hinreichender Genauigkeit abbilden	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Anf_18	Das Prognosemodell muss die physikalischen Größen einhalten	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Anf_19	Das Prognosemodell muss eine aggregierte Betrachtung des Unfalldauerkommens durchführen (makroskopische Perspektive)	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Anf_20	Das Prognosemodell muss keine Widersprüche zu bekannten Beobachtungen aufweisen	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Anf_21	Das Prognosemodell soll die Gesetzmäßigkeiten der relevanten physikalischen Effekte abbilden	(Ja)	Nein	(Ja)	Nein	Ja	Ja	Ja
Anf_22	Das Prognosemodell soll den größtmöglichen Zeithorizont historischer Zeitreihen nutzen	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
Zusammenfassung		++	--	++	-	+	++	++

Anforderungen hinsichtlich der Modellgrenzen:

Nr.	Anforderung	GM ^(1,1)	GM ^(2,1)	MGM ^(1,3)	NN	SD	NN-GA	SD-GST
Anf_23	Das Prognosemodell muss das Deutsche Straßenverkehrssystem betrachten	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Anf_24	Das Prognosemodell muss nicht die erwartete Wirkung einer Maßnahme bestimmen, sondern deren Effekt im Gesamtverkehrssystem prognostizieren	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Anf_25	Das Prognosemodell muss nicht sog. Beinahe-Unfälle prognostizieren können	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Zusammenfassung		+	+	++	++	++	++	++

Anforderungen hinsichtlich der zulässigen Grenzwerte und Abweichungen:

Nr.	Anforderung	GM ^(1,1)	GM ^(2,1)	MGM ^(1,3)	NN	SD	NN-GA	SD-GST
Anf_26	Bei Verwendung eines systemtheoretischen Modellkonzepts, muss das Prognosemodell eine Sensitivitätsanalyse (unterschiedliche Szenarien der Prognose) durchführen	X	X	X	X	Ja	X	Ja
Anf_27	Das Prognosemodell muss ein plausibles Systemverhalten prognostizieren	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Zusammenfassung		+	-	+	-	++	-	++

Anhang F: Maßnahmen im Katalog

Verfügbare Verkehrsmittelmaßnahmen im Katalog:

ID	Bezeichnung	ID	Bezeichnung
VM_1	Abbiegeassistent	VM_18	Fahrzeugkarosserie (modern)
VM_2	Adaptive Cruise Control (ACC); Abstandsregeltempomat (ART)	VM_19	Formschlüssige und kraftschlüssige Ladungssicherung
VM_3	Adaptive Front-Lighting System (AFS); (Adaptives) Kurvenlicht	VM_20	Frontscheibe (verbessertes Sicherheitsglas)
VM_4	Airbag (allg.)	VM_21	Intelligent Speed Adaption (ISA); Intelligente Geschwindigkeitsassistentz
VM_5	Frontairbags für Fahrer und Beifahrer	VM_22	Spurhalteassistent
VM_6	Kopfairbags	VM_23	Nachtsicht-Assistent
VM_7	Seitenairbags für Fahrer und Beifahrer	VM_24	Notbremsassistent mit automatischer Fußgänger- und Radfahrer-Erkennung
VM_8	Alkolock	VM_25	Reifendruckkontrollsystem
VM_9	Antiblockiersystem (ABS)	VM_26	Rollsperre (Berganfahrhilfe)
VM_10	Aufstellbare Fronthaube	VM_27	Rückfahrassistent
VM_11	Bordcomputer	VM_28	Sicherheitsgurt
VM_12	Tagfahrlicht	VM_29	Sicherheitsgurt-Warnsystem
VM_13	Aufmerksamkeits-Assistent	VM_30	Spurwechselassistent
VM_14	Einparkassistent	VM_31	Totwinkel-Assistent
VM_15	Elektronische Stabilitätskontrolle (1. Generation)	VM_32	Warnwestenpflicht
VM_16	Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)	VM_33	Winterreifen
VM_17	Notbremsassistent (EBA)		

Verfügbare Verkehrsobjektmaßnahmen im Katalog

ID	Bezeichnung
VO_1	Aktion „Ich trag Helm“
VO_2	Begleitetes Fahren mit 17
VO_3	Fahrsicherheitstraining
VO_4	Führerschein
VO_5	Führerschein auf Probe
VO_6	Kampagne: Fit statt übermüdet Fahren
VO_7	Sicherheitsstrategie „Vision Zero“
VO_8	Verbot von Zweiwegekommunikation (Mobiltelefone)
VO_9	Verkehrskontrollen
VO_10	Verkehrssicherheitskampagne: „Runter vom Gas!“
VO_11	Verkehrssicherheitskampagne: „WEIL LEBEN SCHÖN IST“

Verfügbare technische Verkehrsinfrastrukturmaßnahmen im Katalog

ID	Bezeichnung
Vlt_1	Automatische Geschwindigkeitsanpassung
Vlt_2	Fest installierte Blitzer
Vlt_3	Leittechnik
Vlt_4	Lichtsignalanlage (LSA)
Vlt_5	Überwachung
Vlt_6	Verkehrszeichenwechselanlage

Verfügbare bauliche Verkehrsinfrastrukturmaßnahmen im Katalog

ID	Bezeichnung
Vlb_1	Geschwindigkeitsbegrenzung
Vlb_2	Kreisverkehr
Vlb_3	Schutzeinrichtungen
Vlb_4	Shared Spaces
Vlb_5	verkehrsberuhigter Bereich

Verfügbare Verkehrsorganisationsmaßnahmen im Katalog

ID	Bezeichnung
VOrg_1	Abstandskontrolle
VOrg_2	eCall
VOrg_3	Geschwindigkeitsüberwachung
VOrg_4	Gesetz zur Einführung des Alkoholverbots für Fahranfänger
VOrg_5	Hauptuntersuchung
VOrg_6	Notrufsäule
VOrg_7	Promillegrenzen und deren Kontrolle
VOrg_8	Straßenverkehrs-Ordnung
VOrg_9	Verkehrsfunk
VOrg_10	Winterdienst-Schneeräumung und -streuen

Anhang G: Potentielle Kausalzeitreihen

ID	Prädiktorvariable
X_1	Gesamtlänge der deutschen Autobahnen [in Kilometern]
X_2	Fahrleistung von Personenkraftwagen [in Milliarden Kilometern]
X_3	Bruttoinlandsprodukt (BIP) je Einwohner [in €]
X_4	Bruttonationaleinkommen (BNE) pro Kopf [in €]
X_5	Bestand an Personenkraftwagen [in N]
X_6	Neuzulassung von Personenkraftwagen [in tausend]
X_7	Fahrzeugführer [in N]
X_8	Pkw-Fahrer [in N]
X_9	Bevölkerung in Deutschland [in N]
X_{10}	Leistungen der Kfz-Haftpflichtversicherung [in Mio.€]
X_{11}	Leichtverletzte [in N]
X_{12}	Unfälle mit Personenschaden [in N]
X_{13}	Unfälle mit Getöteten [in N]
X_{14}	Verunglückte [in N]
X_{15}	Schwerverletzte [in N]
X_{16}	schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden [in N]
X_{17}	Getötete [in N]

Anhang H: Korrelationswerte und Signifikanzniveaus der Kausalzeitreihen

		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1	r	1	0.941	0.999	0.937	-0.956	-0.868	-0.927	-0.935	-0.474	0.662
	α		0	0	0	0	0	0	0	0.017	0
X_2	r	0.941	1	0.945	0.987	-0.987	-0.966	-0.97	-0.968	-0.671	0.814
	α	0		0	0	0	0	0	0	0	0
X_3	r	0.999	0.945	1	0.942	-0.961	-0.868	-0.928	-0.937	-0.483	0.659
	α	0	0		0	0	0	0	0	0.014	0
X_4	r	0.937	0.987	0.942	1	-0.984	-0.944	-0.937	-0.934	-0.7	0.797
	α	0	0	0		0	0	0	0	0	0
X_5	r	-0.956	-0.987	-0.961	-0.984	1	0.95	0.971	0.971	0.632	-0.756
	α	0	0	0	0		0	0	0	0.001	0
X_6	r	-0.868	-0.966	-0.868	-0.944	0.95	1	0.967	0.959	0.73	-0.832
	α	0	0	0	0	0		0	0	0	0
X_7	r	-0.927	-0.97	-0.928	-0.937	0.971	0.967	1	0.999	0.609	-0.765
	α	0	0	0	0	0	0		0	0.001	0
X_8	r	-0.935	-0.968	-0.937	-0.934	0.971	0.959	0.999	1	0.589	-0.747
	α	0	0	0	0	0	0	0		0.002	0
X_9	r	-0.474	-0.671	-0.483	-0.7	0.632	0.73	0.609	0.589	1	-0.732
	α	0.017	0	0.014	0	0.001	0	0.001	0.002		0
X_{10}	r	0.662	0.814	0.659	0.797	-0.756	-0.832	-0.765	-0.747	-0.732	1
	α	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Anhang I: Kausalzeitreihen

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
1991	385147	10076	516835	131093	10955	496	19754	19654	4E+07	221338	11300
1992	395462	9538	527428	130351	11013	510	21060	21251	4E+07	248621	10631
1993	385384	9002	515540	125854	11080	518	21601	21739	4E+07	265203	9949
1994	392754	8853	526229	126723	11143	528	22555	22562	4E+07	258732	9814
1995	388003	8511	521595	122973	11190	535	23354	23308	4E+07	130732	9454
1996	373082	7898	501916	116456	11246	539	23646	23624	4E+07	119180	8758
1997	380835	7742	509643	115414	11309	543	24133	24061	4E+07	109389	8549
1998	377257	7047	505111	108890	11427	551	24780	24615	4E+07	108872	7792
1999	395689	7091	528899	109550	11515	566	25360	25146	4E+07	110725	7772
2000	382949	6827	511577	102416	11712	559	25983	25810	4E+07	107582	7503
2001	375345	6392	501752	95040	11786	576	26741	26516	4E+07	110603	6977
2002	362054	6213	483255	88382	12037	584	27082	26757	4E+07	106591	6842
2003	354534	6054	468783	85577	12044	578	27224	26978	4E+07	102615	6613
2004	339310	5361	445968	80801	12174	590	27875	28071	5E+07	99821	5842
2005	336619	4984	438804	76952	12174	578	28288	28539	5E+07	100073	5361
2006	327984	4717	427428	74502	12531	584	29483	29991	5E+07	96460	5091
2007	335845	4609	436368	75443	12594	588	31031	31487	5E+07	97278	4949
2008	320614	4117	413524	70644	12645	585	31719	32025	4E+07	91144	4477
2009	310806	3867	401823	68567	12813	595	30569	31256	4E+07	89519	4152
2010	288297	3387	374818	62620	12819	599	32137	32770	4E+07	92107	3648
2011	306266	3724	396374	68985	12845	609	33673	34523	4E+07	81487	4009
2012	299637	3375	387978	66279	12879	610	34296	35068	4E+07	82147	3600
2013	291105	3131	377481	64057	12917	615	35045	35737	4E+07	80824	3339
2014	302435	3187	392912	67732	12949	627	36105	36828	4E+07	70479	3377
2015	305659	3277	396891	67706	12993	636	37127	37903	4E+07	68776	3459